UNIVERSITÉ DE BESANÇON
FACULTÉ DES SCIENCES

THÈSES

présentées

pour obtenir le grade d'Ingénieur-Docteur

par

Louis ROUSSEL
Ingénieur Principal des Eaux et Forêts
à Pontarlier (Doubs)

1re Thèse : **Recherches théoriques et pratiques sur la répartition en quantité et en qualité de la lumière dans le milieu forestier; influence sur la végétation.**

2e Thèse : **Les tourbières de Frasne (Doubs) ; leur évolution sous l'action de l'homme.**

soutenues le 5 novembre 1952

devant la Commission d'Examen

MM. TRONCHET Président.
JULLIEN
GLANGEAUD } Examinateurs.
QUANTIN

NANCY
IMPRIMERIE GEORGES THOMAS
Angle des rues de Solignac et Henri-Lepage
1953

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41547625_0033

UNIVERSITÉ DE BESANÇON
FACULTÉ DES SCIENCES

THÈSES

présentées

pour obtenir le grade d'Ingénieur-Docteur

par

Louis ROUSSEL
Ingénieur Principal des Eaux et Forêts
à Pontarlier (Doubs)

1re Thèse : **Recherches théoriques et pratiques sur la répartition en quantité et en qualité de la lumière dans le milieu forestier ; influence sur la végétation.**

2e Thèse : **Les tourbières de Frasne (Doubs) ; leur évolution sous l'action de l'homme.**

soutenues le 5 novembre 1952

devant la Commission d'Examen

MM. TRONCHET Président.
JULLIEN
GLANGEAUD } Examinateurs.
QUANTIN

NANCY
IMPRIMERIE GEORGES THOMAS
Angle des rues de Solignac et Henri-Lepage
1953

R. UNIV.
BIBLIOTHEEK
LEIDEN

Université de Besançon - Faculté des Sciences

Doyen:
M. GLANGEAUD, ✻, I ✿.

Assesseur:
M. JULLIEN, ✻, ⌛, I ✿.

Professeurs:

MM.:

BAILLAUD, ✻, I ✿, ...	Astronomie.
CHATELET, I ✿, ...	Calcul différentiel et intégral.
HAAG, O ✻, I ✿, ...	Mécanique rationnelle et appliquée.
MESNAGE, ✿.	Chronométrie.
DUFFIEUX, I ✿, ❁.	Physique.
PERROT	Chimie générale.
JACQUEMAIN, ✻, ⌛, I ✿.	Chimie appliquée.
GLANGEAUD, ✻, I ✿.	Géologie et Minéralogie.
JULLIEN, ✻, ⌛, I ✿.	Zoologie.
TRONCHET, I ✿.	Botanique.
CROISOT Robert	Maître de conférences de Mathématiques générales.
QUANTIN André, ✿, ...	Maître de conférences de Botanique.
SEIGNIER, I ✿.	Secrétaire principal des Facultés.

PREMIÈRE THÈSE

Recherches théoriques et pratiques sur la répartition en quantité et en qualité de la lumière dans le milieu forestier

Influence sur la végétation

SOMMAIRE

Pages

AVANT-PROPOS 5

PREMIÈRE PARTIE. — LES RECHERCHES EFFECTUÉES OU ACTUELLEMENT EN COURS 11

a) L'œil du forestier 11
b) Le papier photographique et les méthodes photochimiques ... 14
c) Les photomètres à source lumineuse constante 17
d) Les cellules photoélectriques 20
e) Les actinomètres 29
f) Autres études sur la croissance des plants forestiers 33

DEUXIÈME PARTIE. — CONSIDÉRATIONS THÉORIQUES SUR LA RÉPARTITION DE LA LUMIÈRE EN FORÊT 39

a) Le temps nuageux bien égal 43
b) Le temps pur ensoleillé 45

TROISIÈME PARTIE. — RECHERCHES PERSONNELLES 51

1° *Méthode photométrique instantanée* 51

a) L'appareil 54
b) Méthode opératoire 55
c) Répartition de l'éclairement dans les peuplements 59
d) Effets sur la végétation. - Loi du minimum 60
e) Etat électrique de l'atmosphère 63
f) Pouvoir global de réflexion 65

2° *Méthode actinométrique continue* 66

a) Appareils employés 68
b) Résultats des observations en plein découvert 71
c) Résultat des observations sous le couvert 74
d) Aspects comparés de la végétation dans les diverses stations. 79

CONCLUSION 91

BIBLIOGRAPHIE 95

R. UNIV.
BIBLIOTHEEK
LEIDEN

AVANT-PROPOS

« Quand on s'aperçoit combien la somme de nos ignorances dépasse celle de nos connaissances, on se sent peu porté à conclure trop vite ».

(L. de Broglie.)

C'est devenu un lieu commun de dire que la forêt est une usine à produire le bois, chaque arbre pouvant être approximativement assimilé à une machine. La matière première est fournie en abondance par l'eau des précipitations naturelles, et par le gaz carbonique de l'air. En effet, la grume résineuse écorcée, exportée périodiquement de la forêt, comprend à peu près exclusivement des corps ternaires, celluloses, lignines, hémicelluloses, etc... de formule générale $C_xH_yO_z$, affectée de coefficients variés, et élaborés dans la photosynthèse. L'énergie est prodiguée par le soleil, soit sous forme de radiations directes, soit sous forme de radiations diffusées par le ciel et les nuages et ce, en quantité considérable. Dans le Haut-Doubs, et sans que des mesures précises et assez longues aient été jusqu'ici effectuées, on peut penser qu'elle correspond à une puissance moyenne continue de 1 500 kw par hectare.

Le rendement de « l'usine forêt » paraît, par contre, à première vue, assez faible. Si, en effet, considérant par exemple les 11 millions d'hectares de la Forêt Française, dont la possibilité annuelle peut être approximativement évaluée à 10 millions de mètres cubes, et 30 millions de stères, on fait le rapport entre le nombre de calories que pourrait fournir cette production, et l'énergie solaire reçue annuellement sur la surface productrice, on arrive à un rendement de 1/1700 environ. Dans nos régions résineuses de l'Est, nettement plus productives, une récolte de 10 m^3 par hectare et par an correspond à un rendement énergétique de 1/600 environ.

Certes, les grumes résineuses n'ont pas pour destination principale les fovers industriels ou domestiques et, en considérant le seul point de vue calorifique, nous n'avons qu'une expression arbitraire du rendement. Cependant si, nous référant aux données de la thermochimie, qui nous rappelle que la synthèse de 30 grammes de formol, ou de substance hydrocarbonée, nécessite la fourniture de 112.10^3 petites calories environ, en partant de l'eau et du gaz carbonique, nous

calculons que la production de 10 mètres cubes de grumes résineuses exige environ 18.10^9 petites calories, nous constatons, par un procédé tout à fait différent, que le rendement de « l'usine forêt » est de 1/550 ; ce résultat est très voisin du précédent.

Quoique faibles, ces proportions sont loin d'être dérisoires. Dans une récente étude, DUFRAISSE a cité à ce sujet des chiffres extraits de divers travaux et qui, si l'on compare les différentes sources d'énergie disponible ou utilisée, au rayonnement solaire total annuel reçu par le globe terrestre, donnent les rapports suivants :

— Réserves totales de houille 1/34
— Production mondiale de houille par an 1/140.000
— Energie hydraulique disponible par an..... 1/37.777
— Energie hydraulique effectivement utilisée par an. 1/928.205

Ceci veut dire, par exemple, que la totalité des usines hydrauliques actuellement en service ne fournit en un an qu'une énergie égale au millionième environ du rayonnement solaire reçu par le globe terrestre, pendant la même période. Le forestier — et l'agriculteur — ne font donc pas en cette matière si médiocre figure, et disposent actuellement, à la fois, de quantités considérables d'énergie, et du bénéfice d'un rendement qui n'est pas exagérément bas.

Cependant, si, au lieu de considérer le rendement pratique d'une surface forestière, nous recherchons le rendement énergétique réel de la chlorophylle « in vivo », nous arrivons à des chiffres extrêmement satisfaisants, et de l'ordre de 50 % (34 à 59 % suivant les radiations d'après WARBURG) (1).

(1) WARBURG (1923) estime, en effet, qu'il faut 4 quanta pour libérer une molécule d'oxygène (O^2). Ces chiffres ont été discutés : GABRIELSEN (1935-1947) pense que, pour le noisetier et le frêne, la transformation d'une molécule de gaz carbonique exige au moins 12 quanta. EMERSON et LEWIS (1941) fixent à 10 le nombre des quanta nécessaires pour libérer une molécule d'oxygène. Cependant, à plusieurs reprises, WARBURG (1946-1949-1951), confirme ses premières conclusions en les qualifiant de « redécouvertes ». Il s'agit, bien entendu, du rendement de l'énergie effectivement absorbée par la chlorophylle, et non de l'énergie totale incidente.

En ce qui concerne le rendement énergétique pratique de la photosynthèse, c'est-à-dire le rapport de l'énergie effectivement mise en réserve à l'énergie totale incidente, les chiffres obtenus sont nettement plus faibles. CURTIS et CLARK (1950) citent les travaux de BROWN et ESCOMBE qui, dès 1905, estimaient le rendement pratique de la photosynthèse de 0,4 à 1,7 %, selon les cas. Dans le même ordre d'idées, TRANSEAU (1926) fixait le rendement pratique, dans le cas des récoltes de blé, c'est-à-dire le rapport entre l'énergie effectivement mise en réserve dans le grain récolté, et l'énergie incidente pendant la période de croissance, à 0,46 %. S'il avait considéré l'énergie prodiguée pendant une année entière, il aurait obtenu un chiffre assez voisin de celui auquel nous arrivons dans le cas de la production forestière dans le Haut-Doubs.

On a proposé de grouper toutes les recherches relatives au rendement énergétique de la radiation du point de vue de la production végétale, dans une branche spéciale de la physiologie végétale qui s'appellerait la « bioénergétique végétale » (TAUSON - 1947).

Dans ces conditions, le rapport de 1/550 à 1/600 que nous pouvons approximativement adopter comme expression du rendement énergétique de la forêt résineuse du Haut Doubs, nous montre qu'il n'est nullement utopique de penser que des progrès pourront être réalisés dans ce sens, ne serait-ce que par la sélection de races d'arbres utilisant mieux la radiation solaire, en même temps du reste que les autres facteurs naturels qui déterminent la croissance. Les recherches de génétique forestière, sur l'épicéa notamment, sont entrées depuis quelques années dans le domaine de la pratique (Roi et Bouvarel en France), et l'on peut espérer que des résultats tangibles seront bientôt atteints.

Plus chimérique, sans doute, serait l'action utile à exercer sur les facteurs météorologiques. A Besançon, par exemple, sur 100 heures d'insolation possible, le soleil ne brille que pendant 40 heures. Pendant 60 heures, il est caché, et les nuages qui réduisent la radiation ne se résolvent pas obligatoirement sous forme de précipitations. S'il devenait possible de provoquer régulièrement la pluie par les moyens artificiels actuellement à l'étude, on réduirait le « temps de présence inutile » des nuages, et l'on augmenterait à la fois la pluviosité et l'insolation, conditions, on le sait, très favorables à la production végétale en général, et forestière en particulier.

Il n'est pas question, évidemment, d'appliquer aux arbres forestiers, étant donné leurs grandes dimensions, les procédés qui seront sans doute bientôt d'un usage courant en ce qui concerne la productio horticole (serres à éclairage dosé — phytotron du Docteur Went — éclairement complémentaire de Mazda, etc...).

Toutes ces considérations sembleraient donc d'ordre purement spéculatif, et sans grand intérêt pratique immédiat, s'il n'existait un domaine où le forestier a besoin très souvent de faire appel aux notions de radiations, celui des coupes de régénération, ce mot étant pris dans son sens général. « L'arbre machine » jouit en effet de propriétés spéciales : il accumule sur lui-même la matière qu'il fabrique, et se trouve ainsi récolté avec elle — mais il se reproduit naturellement dans des conditions de lumière (ce mot étant employé dans un sens large) données ; il a ensuite besoin d'un climat lumineux déterminé pour se développer rapidement et atteindre, le plus tôt possible, les dimensions qui lui permettront, à nouveau, de devenir une nouvelle machine en pleine production. Le dosage de la radiation est l'un des principaux, l'un des seuls moyens d'action du forestier qui, grâce à la coupe, élimine une partie plus ou moins importante du couvert, et majore ainsi, dans des proportions variables à son gré, la quantité d'énergie qui atteint le sol. Les questions qui se posent fréquemment à lui sont les suivantes :

Quelle quantité de radiation existe sous un peuplement déterminé ? De quelle qualité est cette radiation ? Quelles modifications à

cet état apporte une coupe donnée ? Quelles sont en cette matière les exigences des diverses essences pour leur installation et leur développement ?

Les solutions empiriques sont données depuis longtemps : les notions de coupe sombre, claire, très claire, d'essence d'ombre et de lumière font partie de l'arsenal classique de l'art du sylviculteur. Cependant, depuis quelques années déjà, des chercheurs, à la tête desquels il convient de placer Th. HARTIG et J. WIESNER ont essayé, grâce à des moyens d'abord rudimentaires, puis de plus en plus perfectionnés, d'apporter des précisions chiffrées à ces questions.

Nous nous sommes donc proposé à notre tour d'étudier les conditions de lumière qui règnent dans les sous-bois résineux et feuillus du Haut-Doubs, et d'essayer de déterminer, pour l'épicéa et le sapin, qui y sont de beaucoup les essences principales, les exigences en cette matière pour l'installation et le développement des renaissances.

Nous savons, certes, que les appareils que nous avons utilisés : cellules photoélectriques et actinomètres de BELLANI, sont loin d'être sans reproches. Mais, entre l'ignorance totale et la connaissance absolue, qui n'est du reste jamais qu'approchée, il existe des paliers, et notre ambition a été précisément d'en franchir un.

Nous avons cru utile de compléter ce travail par une petite étude théorique des conditions de la répartition de la radiation dans les peuplements, et par une revue réduite des principaux ouvrages qui ont traité de ces questions.

Au préalable, nous donnerons un résumé des recherches effectuées jusqu'ici en cette matière.

Cependant, malgré notre désir d'être complet, nous avons dû laisser de côté deux aspects importants du problème :

Le premier, qui concerne le mécanisme lui-même de la photosynthèse et son rendement, objets de nombreuses discussions, et sur lesquels des précisions intéressantes sont et seront à bref délai apportées par l'emploi des radio-isotopes.

Le second, qui envisage le mode de distribution de la lumière dans le temps : le photopériodisme qui, depuis les études de GARNER et ALLARD, a fait un peu partout, en France notamment avec CHOUARD, des progrès sensibles.

Malgré l'intérêt extrême de ces questions, nous avons estimé que la première était d'ordre plus purement spéculatif et général, du moins pour le moment, et que la seconde, si elle peut apporter des indications très intéressantes pour l'introduction d'espèces nouvelles, n'avait qu'une importance réduite en ce qui concerne le cas des espèces indigènes, naturellement bien adaptées au climat local et à son photopériodisme propre. Et, à part quelques allusions très réduites à

La lumière et la forêt
(Cliché Stainacre, Pontarlier.)

ces problèmes, nous ne les envisageons pas dans le cadre restreint et plus spécialement pratique que nous nous sommes fixé ici.

Nous avons été très sympathiquement encouragé dans nos recherches par M. le Doyen GLANGEAUD, de la Faculté des Sciences de Besançon, M. le Professeur TRONCHET, dont la grande érudition, jointe à une extrême amabilité, nous ont été très utiles, et qui a su, avec infiniment de tact, atténuer ce qu'aurait pu avoir d'un peu délicat un retour tardif sur les bancs de l'école, M. le Professeur QUANTIN, qui a effectué depuis de nombreuses années des mesures de lumière dans les peuplements feuillus, et dont nous avons utilisé les travaux, M. le Professeur DUFFIEUX, qui nous a donné des indications sur les modifications des montages de la photopile qui lui paraissaient souhaitables.

Nous devons aussi remercier M. HERARD, professeur de Physique à Pontarlier, qui s'est efforcé de nous procurer les documentations spéciales dont nous avions besoin, et M. IABLOKOFF, qui nous a donné divers renseignements, notamment sur l'électricité atmosphérique.

Nous n'aurions garde d'oublier tous les Membres de l'Administration forestière qui nous ont orienté ou aidé : M. l'Inspecteur Général OUDIN, Directeur de l'Ecole Nationale des Eaux et Forêts, qui nous a prêté les actinomètres que nous avons utilisés, M. l'Inspecteur Général SORNAY, M. le Conservateur TURC, M. le Conservateur ROL, M. le Conservateur SILVY-LELIGOIS, dont les observations pertinentes nous ont toujours été très utiles. M. l'Ingénieur Principal JACQUIOT et M. l'Ingénieur FOURCHY nous ont communiqué divers renseignements. M. l'Ingénieur DUCHAUFOUR nous a permis de confronter les points de vue du pédologue, et ceux du « photologue ». M. l'Ingénieur PLAISANCE s'est efforcé de trouver dans sa vaste bibliothèque les références et travaux que nous ne possédions pas. M. l'Ingénieur BÉJEAN a effectué certaines recherches avec nous, et M. l'Ingénieur JACAMON nous a remis diverses documentations sur les actinomètres de BELLANI. Enfin, M. l'Ingénieur POURTET nous a fait profiter de son expérience pour la réalisation pratique de l'impression de cette thèse.

Parmi les Préposés, M. le chef de District LANQUETIN a apporté un dévouement inlassable à relever, quand nous ne pouvions le faire, les appareils installés en forêt, et son activité nous est une garantie absolue de la régularité des observations. MM. les Agents Techniques LOVE et COTE COLISSON ont assuré les observations des postes des Fourgs et de Levier, et M. MONNIN, chef de station de l'E.D.F., celles du poste de Pontarlier.

Ce travail est donc la résultante d'une somme d'actions, de directives, de conseils, d'observations et d'efforts divers, et nous n'avons

fait souvent que les coordonner pour mettre au point la rédaction qui va suivre.

Nous espérons que nos premiers maîtres, et spécialement M. le Directeur GUINIER, M. le Professeur PERRIN et M. l'Inspecteur Général BOURGEOIS, qui nous ont instruit et guidé dans la carrière forestière, y trouveront, ...avec quelque retard, le fruit de leur lucide enseignement.

PREMIERE PARTIE

LES RECHERCHES EFFECTUÉES OU ACTUELLEMENT EN COURS

Il peut paraître présomptueux de brosser un tableau, même rudimentaire, des recherches effectuées ou actuellement en cours, sur les applications forestières du dosage de la lumière ou de la radiation. Depuis les premiers essais de WIESNER, les observations se sont multipliées, les appareils se sont perfectionnés, les problèmes se sont compliqués. L'ensemble des travaux forme à lui seul une somme déjà importante, avec ses théories, ses contradictions et ses impasses, ses fidèles et ses contempteurs, et les indications générales que nous allons donner ne seront que les jalons qui ont marqué la route suivie par une foule toujours plus grande de chercheurs.

A. - L'œil du forestier

Il est évident que pendant très longtemps, l'œil a été l'unique moyen d'appréciation dont a disposé le sylviculteur. Sans remonter aux temps lointains où PLINE l'ANCIEN comparaît les ombrages donnés par les diverses essences forestières et ornementales, il nous paraît utile de citer, parmi de nombreux autres exemples recueillis notamment par HÜFFEL, les règles données en 1784 par WEBER, maître forestier de la Seigneurie de Ribeauvillé, au sujet de la régénération du hêtre :

« Les arbres mères qui pourront porter trop d'ombrage à leur jeune filiation, seront éclaircis, pour autant que l'œil du forestier fera envisager leur ombre comme destructive de la jeune poussée ».

Voici des principes déjà tout à fait nets de sylviculture, fondés uniquement sur l'appréciation de l'opérateur. Or, dans la pratique, les plus récents ouvrages de sylviculture sont encore basés sur cet élément subjectif, qu'il s'agisse de l'importance des opérations ou de l'exigence des essences. Que vaut donc l'œil du forestier ?

Il est évident qu'en ce qui concerne l'évaluation des dimensions, diamètres et hauteurs des arbres en particulier, le sylviculteur peut assez vite acquérir une pratique qui lui permet de se substituer, dans une certaine mesure, à des appareils plus précis. Mais il faut bien

se rendre compte que cette éducation de l'œil s'opère toujours par comparaison avec des éléments qui restent stables: la taille d'un homme, d'une bête de trait, la hauteur des fougères, des noisetiers voisins, l'importance des branches, l'inclinaison de la tête de l'observateur, etc... Si, par hypothèse, les dimensions des arbres à mesurer et celles de tous ces repères instinctifs étaient multipliées par deux, il est fort probable que l'observateur serait absolument désorienté, et que ses évaluations absolues ne vaudraient plus rien.

Or, l'appréciation de l'intensité de la lumière — puisque l'œil reçoit seulement une partie, dite visible, de la radiation — rencontre

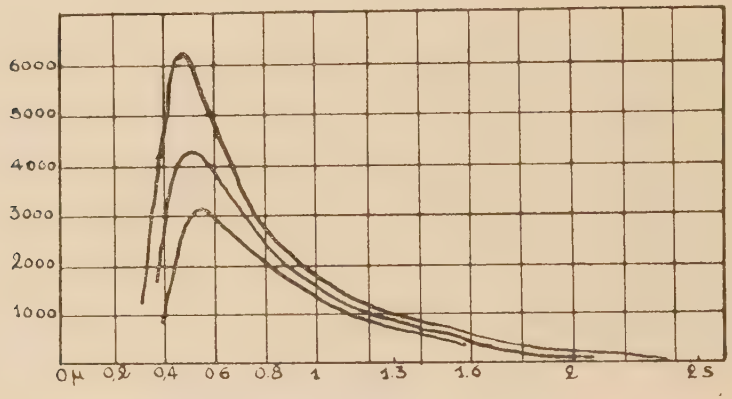


FIG. 1.

Répartition spectrale de l'intensité énergétique dans le rayonnement solaire aux confins de l'atmosphère et sensiblement au niveau de la mer pour m = 1 et m = 2 (MAURAIN).

de nombreux obstacles: absence en forêt de points de comparaison, changement de composition du flux lumineux, variation très rapide et automatique du diamètre de la pupille qui fait que la quantité de lumière qui atteint la rétine reste assez égale, alors que les conditions extérieures varient dans de très fortes proportions. D'après C. FABRY, l'œil est sensible à des éclairements qui vont de 1/3000 de lux (ciel nocturne sans lune) à 100.000 lux (plein soleil). L'amplitude des tolérances va donc de 1 à 300 millions.

En présence de deux plages lumineuses, il peut apprécier leur égalité, ou affirmer que l'une est plus éclairée que l'autre, sans dire en général de combien. Mais dans une lumière déterminée, il est en général incapable d'indiquer la valeur en lux de l'éclairement qu'il reçoit. Bien plus, on sait que la courbe de sensibilité oculaire (voir fig. 2) présente un maximum pour la longueur d'onde 0,555 μ. Or, si la couleur principale d'une lumière complexe change (et c'est le

cas pour les sous-bois feuillus), l'impression lumineuse subjective peut faire croire à une modification importante, alors que l'intensité physique reste la même. Enfin, aux faibles intensités, le maximum de sensibilité de l'œil se déplace vers le bleu (Phénomène de PURKINJE), ce qui complique encore le problème.

Cependant, on peut remarquer qu'à défaut de l'absence d'une sensation précise pour telle ou telle intensité de la lumière incidente, l'œil possède un dispositif qui, à la rigueur, pourrait être utilisé pour donner une idée de cette intensité : c'est justement le diamètre de la pupille.

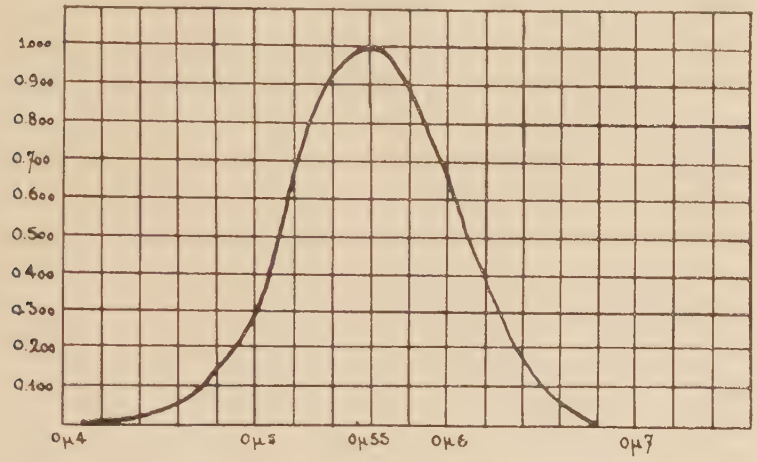


FIG. 2.

Courbe de visibilité de l'énergie rayonnante (œil) - (GIBSON et TYNDALL).

D'après LOWENSTEIN et WESTPHAL on a, en effet, les rapports suivants :

Eclairement en Lux	Diamètre pupillaire (en mm)
400	2,4
100	2,6
45	2,8
25	3 -
10	3,4
4	3,7
2,3	4 -
1	4,5

REEVES (1918), WAGMAN et NATHANSON (1942) et COLEMAN (1947) ont mis en évidence des relations du même ordre.

On a donc une correspondance nette entre l'éclairement reçu par l'œil et le diamètre de la pupille, et il n'est pas interdit d'imaginer un dispositif simple (glace portant une graduation par exemple) qui permettrait de donner une idée approchée sur l'intensité de la lumière incidente.

Il existe même un petit appareil très ingénieux, le Kerato-Pupillomètre du Professeur THOMAS, qui permet, grâce à un dispositif optique, de projeter sur l'œil un spot lumineux rouge de surface que l'on fait varier avec un diaphragme, et ainsi, en appréciant les coïncidences, de déterminer la surface exacte de la pupille. Malheureusement, les variations dans les relations sont à prévoir selon le sujet, son âge, sa sensibilité, et les indications photométriques que l'on peut en tirer sont forcément fort imprécises.

On nous objectera certes que, si le forestier ne peut indiquer la valeur précise de l'éclairement qu'il reçoit, il peut au moins apprécier si les jeunes renaissances résineuses ou feuillues, qui sont sous tel ou tel couvert, présentent ou non une croissance satisfaisante. Nous l'admettrons parfaitement, mais comme nous ne savons pas, en vertu de la loi du minimum, si un aspect chétif est dû à l'absence ou à l'excès de lumière ou d'eau, ou bien à des conditions de sol défavorables, nous ne pouvons sûrement déduire, du seul aspect des régénérations, si le climat lumineux dans lequel elles se trouvent représente telle ou telle valeur précise exprimée en lux, ou en un pourcentage donné de l'éclairement en plein découvert. Il faut donc à peu près obligatoirement faire appel à des procédés extérieurs à l'observateur, à des instruments que nous allons succinctement examiner.

B. - Le papier photographique et les méthodes photochimiques

D'après le Dr KNUCHEL, c'est Th. HARTIG, qui le premier, en 1877, eut l'idée d'observer le noircissement d'un papier photographique pour mesurer l'intensité de la lumière régnant dans les sous-bois. Il avait une échelle comparative, et exposait son papier pendant un temps donné, puis observait la teinte obtenue. Aucun résultat pratique ne fut acquis.

Julius WIESNER, dès 1890, reprit ces travaux d'après la méthode de BUNSEN et ROSCOE.

On rappelle que cette méthode utilise le papier sensible au chlorure d'argent, dont on observe le noircissement, en admettant que pour une couleur déterminée on a la relation :

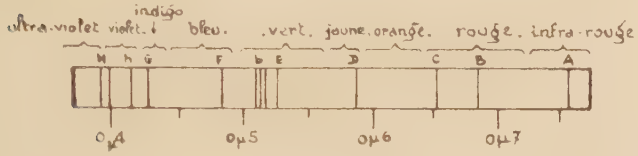
$$it = i't'.$$

Il devient plus facile de se référer à une teinte donnée, et c'est ici le temps mis par le papier à atteindre cette teinte qui détermine

l'intensité de la lumière. On opère par comparaison entre le sous-bois et le plein découvert, et l'on obtient la valeur de l'éclairement relatif. Voici quelques chiffres :

Le minimum nécessaire, d'après Wiesner est, pour le bouleau, de 11 %, — pour l'érable champêtre, de 2,3 %, — pour le hêtre, de 1,7 %. Ce minimum varie avec la latitude. Ainsi l'érable plane, qui exige au moins 1,9 % à Vienne, en désire 3,5 % en Norvège du Sud, et 20 % en Norvège du Nord. Wiesner s'est livré à des études très poussées sur la répartition de la lumière en forêt et

Spectre solaire.



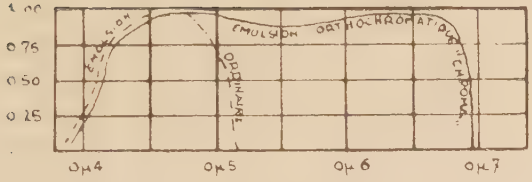


Fig. 3.

Spectre solaire et courbe de sensibilité des émulsions photographiques (Lumière).

même dans les cimes, sur l'influence des images solaires, et il est impossible, en quelques lignes, de résumer ses multiples travaux. Compte tenu de l'imprécision du procédé qu'il employait, c'est indéniablement l'un des précurseurs de la photologie forestière.

Le Dr Rubel a opéré en 1908 avec le « wynnes infaillible exposure meter », mais, d'après les expérimentateurs qui se sont servis de cet appareil, la détermination de la teinte étalon à atteindre était difficile. Le Dr Cieslar, en 1911, a également employé cette méthode, dans la Station de Recherches autrichienne de Mariabrunn. Il est à noter, du reste, que dès que l'on a disposé de papiers spéciaux, le Dr Wiesner essaya de déterminer la composition spectrale de la lumière des sous-bois, en employant le « Rodamin B papier » plutôt

sensible au jaune, et le « Normal papier » sensible seulement aux courtes longueurs d'onde

Une méthode un peu différente consiste à utiliser un papier sensible gradué avec un coin gris neutre de gélatine (coin de GOLDSBERG). Il suffit de lire le dernier chiffre visible sur le papier après exposition pendant un temps donné.

La méthode photographique a gardé de chauds partisans. LUNDEGARDH (1930) a procédé à des enregistrements tous les 1[4 d'heure avec un papier sensible. ARCICHOVSKY a renouvelé ces mesures d'après des procédé analogues en 1932. G. LEMÉE, en 1937, a employé le papier photographique de WIESNER, en prenant toutefois la précaution, par temps ensoleillé, de protéger ledit papier par un écran situé à 10 centimètres environ au-dessus. Il donne les chiffres suivants comme éclairements relatifs sous des peuplements divers :

— Pin sylvestre : de 30 à 63 % suivant l'âge et la densité des tiges.
— Feuillus en période de repos de végétation : 62 % en moyenne.
— Feuillus en période active de végétation : 4 à 5 % en général ; 15 à 19 % pour les chênes.

Il n'a pas observé de jeunes renaissances de chênes au-dessous de 3,8 %, mais a trouvé des jeunes hêtres et sapins à 1,5 %.

Le traité assez récent de WEAVER et CLEMENTS (1929) : Plant Ecology, au chapitre Lumière, conseille encore le « simple photometer » basé sur le même principe.

Enfin, actuellement, la section forestière de l'Ecole d'Oxford (Dr LEYTON - 1950)) met au point un procédé photochimique basé sur la réaction de l'oxalate d'uranium et de l'acide oxalique, en présence de la lumière. Ces produits en solution sont contenus dans des ampoules de verre suspendues aux arbres. On dose, en fin d'observation, la proportion des deux corps et l'on en déduit la quantité de lumière totale reçue. Le Dr LEYTON note que cette méthode est imparfaite, car elle enregistre surtout les rayons bleus et violets. Et c'est le reproche principal que l'on peut faire à ces méthodes photochimiques, surtout aux premières (voir figure 3), qui utilisaient les papiers dont les expérimentateurs ignoraient les caractéristiques, en estimant en outre qu'ils obéissaient à la loi de BUNSEN et ROSCOE, sur la constance du produit Temps × Intensité Lumineuse, pour arriver à un noircissement donné. Maintenant que la « Sensitométrie » s'est développée, principalement sous l'impulsion de HURTER et DRIFFIELD, on sait que le noircissement d'une émulsion photographique (plaque ou papier) obéit à des règles plus complexes. On a proposé de remplacer la loi :

$$i.t = i'.t'$$

par celle de SCHWARZSCHILD :

$$i.t = i'.t'p$$

(p caractérisant l'émulsion).

On sait, en tous cas, que c'est dans des limites très étroites que la loi de BUNSEN et ROSCOE s'applique correctement (de 1 à 10 Lux (?)). Sa généralisation entraîne donc, dans l'énoncé des résultats, des erreurs importantes.

On peut remarquer, enfin, que, de l'avis de tous les spécialistes, les expériences de sensitométrie doivent se faire à la lumière diffuse (verre dépoli) qui donne des qualités de régularité très supérieures à la lumière directe.

C. - Les photomètres à source lumineuse constante

L'appareil à source lumineuse constante est l'un des types les plus anciens de photomètres (BOUGUER - 1729).

Il est basé sur le fait que l'œil peut apprécier l'égalité de deux plages éclairées (dont l'une par une source étalon), alors que, nous l'avons vu, il évalue difficilement les rapports entre deux éclairements différents.

L'une des premières utilisations forestières, et certainement l'une des plus intéressantes, a été faite par le Dr KNUCHEL, de Zurich, en 1914. Le but que poursuivait ce chercheur était, non pas tellement de déterminer le pourcentage de lumière totale existant sous divers peuplements, que de fixer la proportion des diverses longueurs d'ondes de la lumière sylvestre. Il est arrivé à ce résultat en employant un spectrophotomètre à source lumineuse constante construit par le Dr SCHWEITZER, de Zurich.

Le principe d'emploi de l'appareil consiste à choisir comme étalon le spectre fourni par une lampe spéciale donnant 1 bougie HEFNER sous 3,5 v, et alimentée par accumulateur. 5 points fixes du spectre sont choisis comme repères (Rouge : 0,652 μ ; Jaune : 0,589 μ ; Vert : 0,520 μ ; Bleu : 0,472 μ ; Indigo : 0,440 μ).

L'expérimentateur opère uniquement par temps pur ensoleillé, et compare au spectre étalon, d'abord celui fourni par une portion réduite du ciel au zénith (ouverture de l'objectif vertical : 12°), puis celui fourni, en forêt, par la voûte du feuillage. Le Dr KNUCHEL note la difficulté de manœuvre d'un appareil unique de 34 kg, à transporter rapidement d'un point à un autre, les grandes variations de la luminosité du zénith, qu'il a observées du reste, et qui rendent infructueuses de nombreuses mises en station, l'angle assez faible de visée de l'appareil, qui ne donne qu'une petite partie de la voûte de feuillage, et ne permet pas d'avoir une idée de la valeur moyenne de l'éclairement en forêt : les chiffres obtenus étant très variables selon les stations.

L'auteur a mesuré en premier lieu la transparence des feuilles

isolées suivant qu'elles ont crû à l'ombre ou au soleil. Il les plaçait simplement sur l'objectif de son photomètre. La transparence des premières est nettement plus forte que celle des secondes. Voici les chiffres donnés pour le tilleul, le noisetier et le hêtre (chiffres moyens) :

	Feuille d'ombre	Feuille de soleil
	—	—
Rouge	9-12	0-8
Jaune	11-19	6-15
Vert	16-25	6-12
Bleu	5	2-5
Indigo	traces	0-2

(en % de la lumière zénithale en station découverte).

Transmission sélective de la lumière par les feuilles (KNUCHEL).

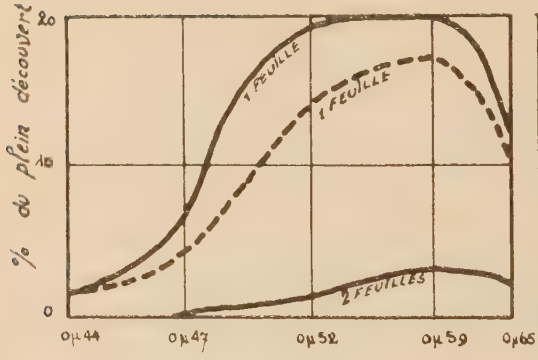


FIG. 4.
Hêtre (feuilles d'ombre).

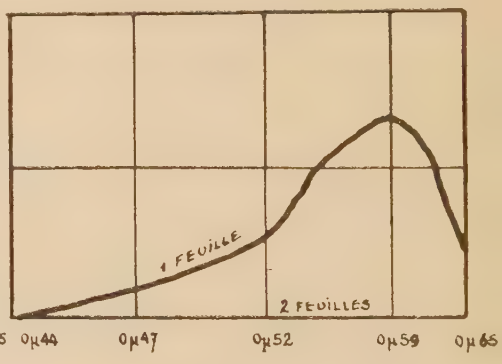


FIG. 5.
Hêtre (feuilles de lumière).

On remarque d'abord la nette prédominance des radiations jaunes et vertes (figures 4 et 5). Les aiguilles de résineux sont à peu près opaques à la lumière. Rien ne passe qui puisse être mesuré avec l'appareil. Leur couleur n'intervient donc à peu près pas (sauf par réflexion) pour modifier la composition de la lumière du sous-bois.

Après s'être intéressé à la transmission de la lumière par les feuilles isolées, le Dr KNUCHEL a considéré des peuplements entiers et des arbres isolés. Ne parlons que des premiers, et citons les chiffres suivants, traduits du reste dans les figures 6 et 7 :

	HETRES		EPICEAS	
	denses	éclaircis	denses	éclaircis
Rouge	4,5	25,5	4,2	33,2
Jaune	6,4	35,9	5,2	33,7
Vert	4,9	19,9	5,5	34,8
Bleu	3,6	13,2	4,1	32,8
Indigo	3,1	11,9	4,0	32,0

(en % de la lumière zénithale en station découverte).

L'auteur cite à ce propos les travaux du Dr ENGLER qui a mesuré la densité et la surface des feuilles, et estime qu'il y a : pour 1 ha de hêtraie 5,6 ha de surface foliacée et pour 1 ha de pessière 12,8 ha de surface d'aiguilles.

De cet ensemble de mesures, ressort une impression concordante :

Transmission sélective de la lumière par les cimes de peuplements constitués (KNUCHEL).

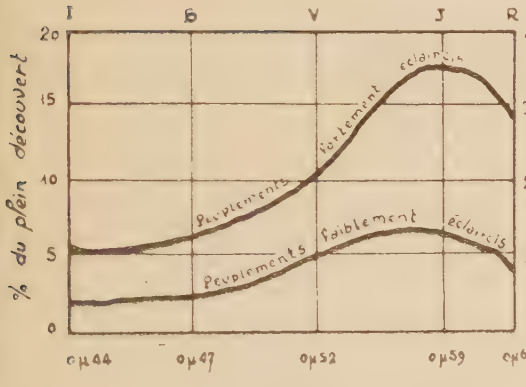


FIG. 6.

Hêtres (Jeunes peuplements).

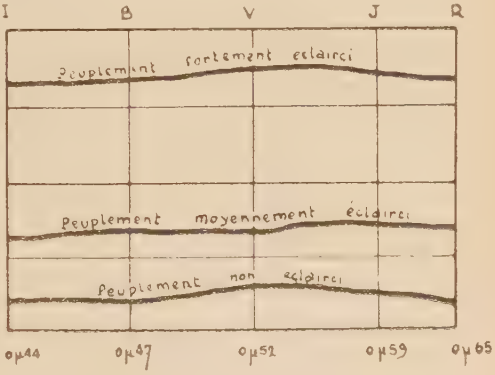


FIG. 7.

Sapins et Epicéas

la lumière du jour subit dans les peuplements résineux un affaiblissement considérable, mais sa composition est peu modifiée. Par contre, dans les peuplements feuillus, elle prend nettement une teinte jaune vert.

QUANTIN a utilisé, en 1933-1934, un posophotomètre à lampe des établissements Filmograph, pour des mesures d'éclairement relatif dans diverses formations forestières du Jura méridional. Il s'agit ici d'un appareil à source lumineuse constante, qui ne détaille pas les radiations, mais fournit des indications globales. Nous donnons une reproduction graphique des résultats de cet important travail à la figure 12.

D. - Les cellules photoélectriques

Dans l'excellent petit ouvrage consacré à cette question, J. TERRIEN distingue trois sortes de cellules :

a) celles dont la résistance varie avec l'éclairement, et qui nécessitent une source de courant électrique extérieure.

b) celles dites « photoémissives », qui émettent un courant proportionnel à l'éclairement reçu, mais nécessitent cependant une source de courant électrique accessoire.

c) celles enfin qui servent couramment en photographie sous le nom de « posemètres», mais dont l'usage se répand de plus en plus comme luxmètres, et qui portent le nom exact de « photopiles ». Ce sont des sources de courant électrique absolument indépendantes, et sous la seule influence de la lumière qu'elles reçoivent.

Il est évident que les dernières sont susceptibles d'un emploi très courant pour mesurer la lumière en forêt, à cause de leur légèreté, de leur maniabilité, et de leur faible prix. Les autres types, qui nécessitent une source accessoire de courant, et sont fragiles et coûteux, conviennent plutôt pour des travaux de laboratoire. L'intérêt de tous ces appareils réside aussi dans le fait que l'explication de leur fonctionnement a contribué à faire naître la théorie actuellement admise sur la nature de la lumière « la mécanique ondulatoire ». On peut rappeler que les photons, ou grains minuscules d'énergie dont la pluie constitue les radiations, sont associés à des mouvements vibratoires qui caractérisent leurs longueurs d'ondes.

L'énergie E d'un photon associé à une longueur d'onde λ est égale à :

$$\frac{h.\,c}{\lambda}$$

h étant la constante universelle de PLANCK, et c la vitesse de la lumière.

On voit très simplement que l'énergie d'un photon violet ($\lambda = 0{,}4\,\mu$) est presque deux fois plus grande que celle d'un photon rouge ($\lambda = 0{,}7\,\mu$). Ces questions interviennent de plus en plus dans le calcul du rendement énergétique réel des feuilles isolées, des cultures agricoles et des peuplements forestiers, auquel nous avons fait allusion plus haut. (Voir figures 8, 9 et 10).

Les cellules photoélectriques émettent donc, ou laissent passer un courant d'intensité variable selon l'éclairement reçu. Ce courant électrique passe dans un micro-ampéremètre de graduation convenable, qui indique très souvent directement la valeur de l'éclairement reçu en Lux. Les recherches poussées que l'on a fait récemment sur ces appareils rendent de moins en moins nécessaires les corrections. Il est évident que les premières cellules étaient sensibles seulement à

FIG. 8.

Variations du spectre d'absorption d'une solution acétonique de chlorophylle exposée à la lumière (WURMSER).

un groupe de radiations réduit. Leur « seuil » de sensibilité, du côté des grandes longueurs d'ondes était d'abord le suivant :

au sodium	0,5 μ
au potassium	0,55 μ
au cessium	0,66 μ

On a pu reporter cette limite au delà de la partie visible du spectre, grâce à des traitements appropriés. Actuellement, les cellules au césium traité fonctionnent jusqu'à 1,2 μ.

Les « photopiles » ont eu, elles aussi, des courbes de sensibilité peu satisfaisantes ; mais leur perfectionnement a permis d'étendre

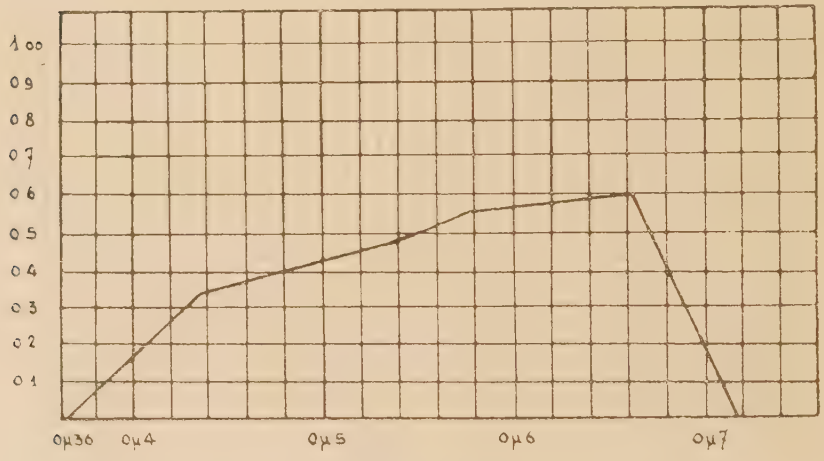


FIG. 9.

Courbe d'efficience photosynthétique de la chlorophylle (WARBURG et NEGELEIN).

leur action beaucoup plus loin, et la courbe de la cellule L. M. T. 3001-A que nous reproduisons à la figure 11, montre les progrès réalisés en cette matière. On peut opérer pratiquement, soit avec un seul appareil, en se transportant assez rapidement, par temps égal, du plein découvert au peuplement à étudier, — soit avec deux appareils dont on vérifie la marche synchrone auparavant, ces appareils étant portés et lus par des opérateurs munis de chronomètres réglés soigneusement, ou installés à demeure avec un dispositif d'enregistrement automatique. Une excellente solution consisterait à pouvoir placer, au-dessus du point où l'on opère en forêt, plus haut que la cime des arbres, la seconde cellule qui serait reliée à un dispositif de lecture au sol. Un seul opérateur aurait donc, à la fois, au même moment, les deux indications correspondant au sous-bois et au plein

découvert. La difficulté ne serait pas grande pour les taillis ou des peuplements bas (perches en aluminium - pylônes légers, etc...). Mais, pour des peuplements résineux qui atteignent couramment 20, 25, 30 mètres, et même davantage de hauteur totale, le problème deviendrait nettement plus difficile.

Les cellules ont été souvent employées pour des mesures globales en forêt. Il est à noter que les indications de ces appareils, sous les

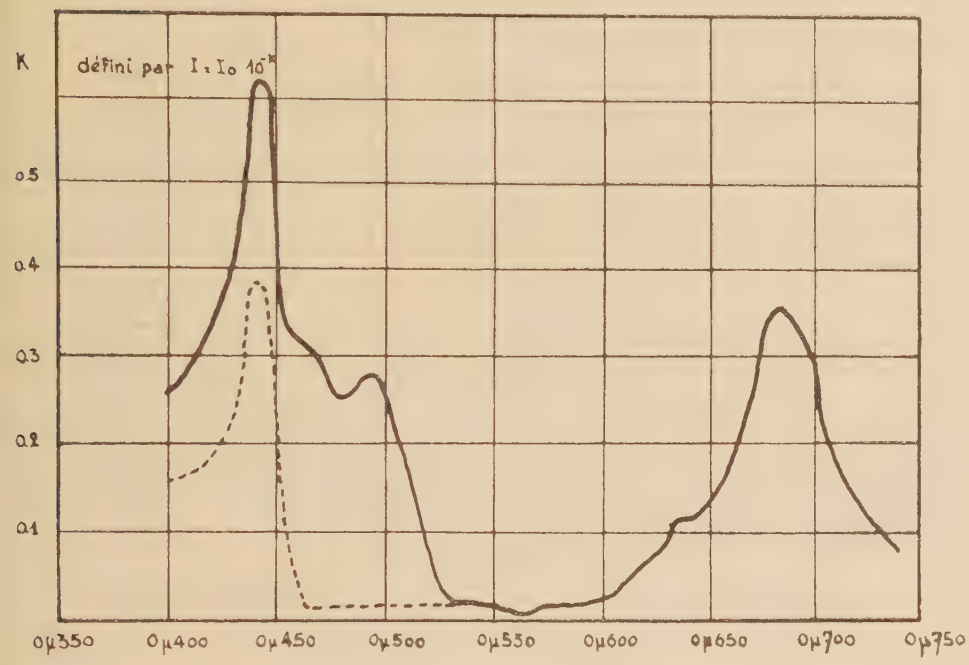


Fig. 10.

Spectre d'absorption de la feuille d'algue *Ulva lactuca* (Wurmser).
....Spectre de la chlorophylle seule, dans l'algue *Ulva lactuca*.

résineux, peuvent être considérées comme sensiblement exactes. Par contre, sous les feuillus, et si les cellules employées sont un peu sélectives (sensibilité accrue au jaune et au vert), les chiffres obtenus seraient trop élevés. La correction serait du reste assez facile à faire, du moins de façon approchée, en connaissant la courbe de sensibilité des appareils, et la composition de la lumière sylvestre (références aux expériences du Dr Knuchel citées plus haut).

Le Dr Ramann, sans doute l'un des premiers, utilisa la cellule au sélénium pour des mesures de lumière en forêt (1911). Ces cellules sont assez sélectives, du moins celles que l'on utilisait au début du

siècle, et les objections faites à la méthode photochimique s'appliquent, « mutatis mutandis », également ici.

Depuis, son emploi s'est bien répandu. Nous pouvons citer LUNDEGARDH (1930) et surtout QUANTIN (1935) qui a fait un large usage de ces appareils pour déterminer l'éclairement absolu régnant dans divers groupements végétaux du Jura Méridional : (*Querceto - Buxetum, Querceto - Lithospermetum, Fagetum, Acereto - Fraxinetum, Querceto - Carpinetum*).

Pour les fortes intensités lumineuses, il utilisait soit des résistances supplémentaires du galvanomètre, soit une réduction de la sur-

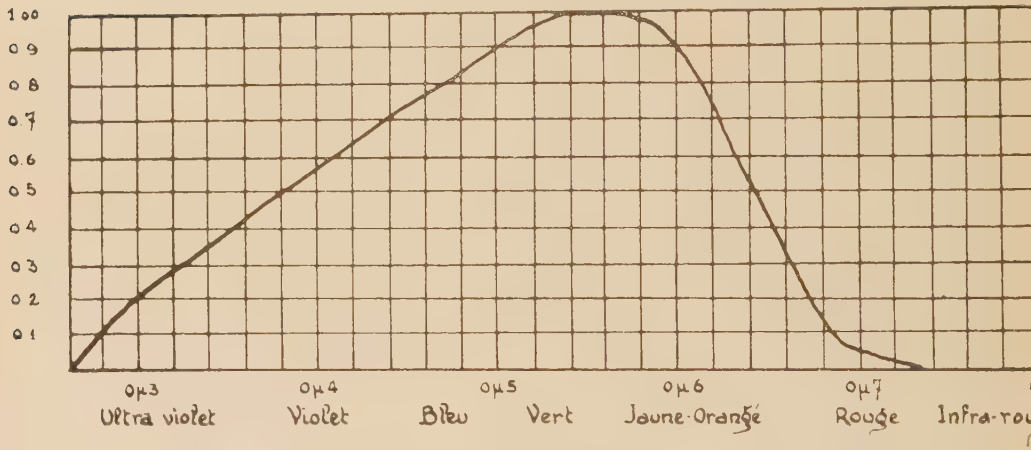


FIG. 11.

Courbe de sensibilité des cellules photoélectriques LMT en fonction des longueurs d'onde de la lumière.

face de la cellule, soit enfin des coins gris neutres donnant des réductions graduées pouvant aller de 2 à 1 000.

Les mesures d'éclairement absolu étaient faites aux principales périodes de végétation, par temps très ensoleillé, et à midi, en plein découvert et sous différents peuplements. Nous donnons par ailleurs (voir figure 12) un graphique extrait de la belle thèse sur « L'évolution de la végétation à l'étage de la chênaie dans le Jura Méridional » et qui caractérise parfaitement la variation du couvert au cours d'un cycle annuel complet.

A peu près à la même époque, WALTER préconise un appareil analogue : le métrophot.

Le Dr LAUSCHER fit, en 1934, une série d'expériences avec deux cellules photoélectriques du type « photopile », l'une à l'extérieur du peuplement, l'autre en forêt, munies de dispositifs d'enregis-

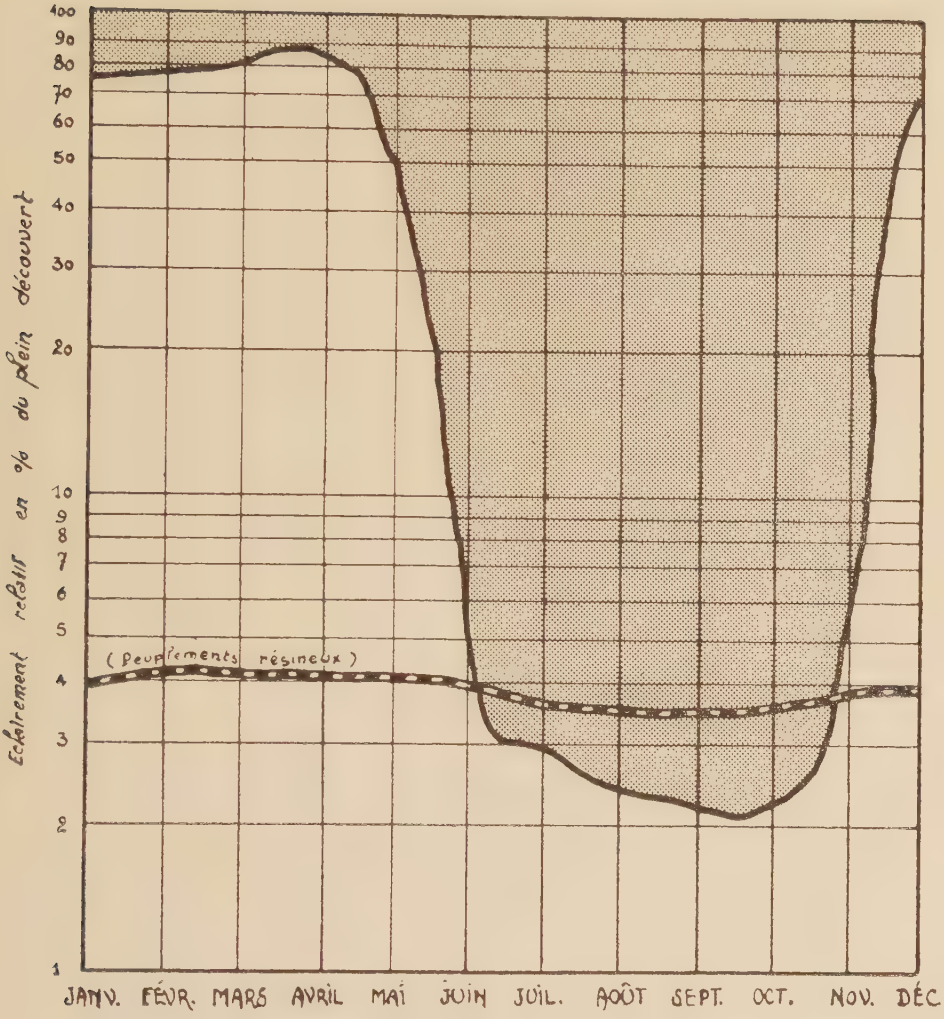


FIG. 12.

Variation annuelle de l'éclairement relatif dans les peuplements feuillus (Chênaie) - (QUANTIN).

trement électrique, qui chaque minute, fixaient par un point la valeur de l'éclairement sur une bande de papier. En même temps, avec une troisième cellule, l'expérimentateur notait les valeurs d'éclairement dans des stations intermédiaires. Les résultats trouvés sont ceux que l'on attendait : 5 à 10 % sous les résineux moyennement denses, 1,5 à 2 % sous les résineux très denses, 80 % sous les frênes en hiver, et 25 % en été, 65 % sous les hêtres en hiver et 5 % en été. Par ailleurs, le Dr LAUSCHER cite les expériences de SCHREILER qui, réduisant de 25 % l'éclairement grâce à des filets, fait ainsi baisser la croissance du jeune plant de frêne de 50 %, et celle du pin de 90 %. Cet effet nous paraît toutefois un peu excessif. BACON, en 1936, et MORRIS, en 1937, employèrent également cet appareil.

WAGNER fit, en 1938, dans le cadre des études de la S.I.G.M.A. de Montpellier, des études avec des cellules G. LANGE. Il donne des chiffres assez précis au sujet de l'éclairement relatif des diverses formations méridionales (Pin - Chêne Yeuse, etc...). Cependant, il semble que certaines réserves soient à faire au sujet des résultats obtenus. En effet, l'expérimentateur a dû utiliser un système de filtres ou de caches pour pouvoir faire fonctionner sa cellule à la fois en plein découvert, et sous des peuplements denses. Ceci est très général, car les constructeurs de ces appareils, utilisés en général pour des fins industrielles (éclairagisme) envisagent rarement des étendues de graduation allant de 1 à 100 000 lux, par exemple, comme ce serait nécessaire. C'est ce système de caches ou d'écrans qui introduit fréquemment des erreurs, et il semble que ce soit le cas pour les expériences de WAGNER, qui a relevé des intensités, en plein air et en hiver, de 140 - 152 et même 160 000 Lux. Par ailleurs, l'auteur a mesuré l'éclairement, tous les mètres en supprimant les taches de lumière, ce qui fait que les chiffres moyens obtenus comme valeur de l'éclairement relatif sont sans doute nettement trop faibles.

WEAVER et CLEMENTS, dans leur « Plant Ecology » (1929) conseillent le « Weston sunlight meter », photopile sensible à une large gamme de radiations.

Un travail très intéressant a été publié en 1940, par le Dr NÆGELI, Ingénieur forestier à Zurich, sur les mesures d'éclairement en plein air et sous bois, dans divers massifs forestiers suisses. L'auteur utilisait deux photopiles de fabrication allemande (Metrawatt) qui avaient 4 sensibilités :

0-100 — 100-1 000 — 1 000-10 000 — 10 000-100 000 Lux.

Les deux dernières étaient obtenues par l'adjonction de filtres gris neutre. Les deux appareils étaient placés, l'un à l'extérieur, l'autre à l'intérieur d'un peuplement, et les lectures faites simultanément à heure fixe. Il semble qu'ici, l'emploi des filtres n'a pas

Courbes de fréquence des valeurs de l'éclairement relatif
(WERNER NÆGELI)

—— Peuplements résineux purs.
— - — - — Peuplements résineux et feuillus en mélange.
..... Peuplements feuillus purs.

FIG. 13.
Avant la pousse annuelle

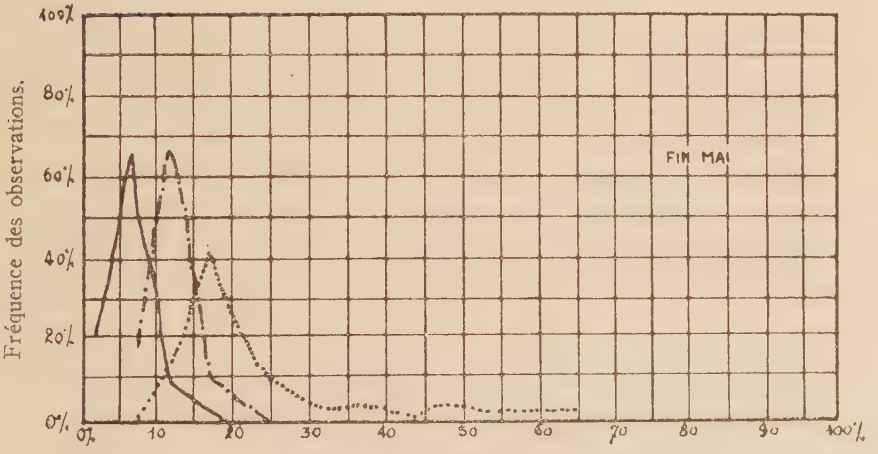


FIG. 14.
Après la pousse annuelle.

donné lieu aux erreurs possibles signalées plus haut, car les résultats sont très logiques.

L'auteur a d'abord utilisé un appareil en plein air, en l'exposant au Zénith, au Nord, au Sud, à l'Est et à l'Ouest, pour chacune des lectures. Les constatations sont les suivantes :

a) *en cas de temps ensoleillé pur,* le photomètre au Zénith indique une lumière assez constante avec maximum à midi. Même allure pour les indications du photomètre exposé au Sud. Celui orienté au Nord conserve une valeur faible toute la journée. Celui exposé à l'Est présente un maximum le matin. Celui exposé à l'Ouest, un maximum le soir.

b) *en cas de temps couvert,* le photomètre exposé au Zénith indique une lumière qui croît de 8 ou 9 heures à 13 heures, puis décroît. Les 4 expositions Nord, Sud, Est et Ouest donnent sensiblement la même valeur, avec maximum peu accusé vers 13 heures, traduisant le caractère égal de la lumière diffuse horizontale, dans toutes les directions.

En ce qui concerne la lumière relative sous le couvert, l'auteur a opéré dans 3 peuplements réguliers (épicéas — feuillus — épicéas et feuillus). Il a établi les courbes de fréquence des diverses mesures obtenues, courbes qui rappellent les courbes de Gauss, avec maximum en général nettement accusé (voir figures 13 et 14). Voici les valeurs moyennes trouvées par le Dr Nægeli :

	Feuillus purs	Feuillus-Résineux	Résineux purs
Fin avril	51 %	22 %	8 %
Fin mai	23 %	14 %	7 %
Fin juin	5 %	4 %	4 %

Cet auteur a également procédé à des enregistrements dans des trouées naturelles.

Ses conclusions sont très nettes :

— par temps couvert (lumière diffuse uniquement) *l'éclairement relatif reste très sensiblement stable,* sous bois, comme dans les trouées, quand la lumière extérieure varie dans des proportions allant de 1 à 6.

— par contre, par temps clair, les rapports sont beaucoup plus compliqués. A la suite du Dr Knuchel, Nægeli insiste sur l'importance très grande de la lumière diffuse en ce qui concerne sa proportion dans la lumière totale en général, et son action primordiale sur la vie des plants forestiers.

En 1945, Farrow et Pelton ont proposé, après 9 années d'expérimentation, un instrument donnant un tracé photographique continu du logarithme de l'intensité lumineuse en fonction du temps, et

qui serait pratique ainsi pour des mesures de longue durée en forêt.

En 1951, la nouvelle édition du *Pflanzen Sociologie* de Braun-Blanquet cite les travaux de Tchou et Tomaselli, qui ont mesuré l'éclairement absolu régnant en plein découvert, et sous différentes associations de la région méditerranéenne. Il semble qu'ici encore, comme dans les travaux de Wagner déjà cités, les filtres n'aient pas été très satisfaisants, car Tchou indique en plein air un éclairement de l'ordre de 120 000 Lux, ce qui semble un peu élevé.

L'Ecole Anglaise d'Oxford fait, concurremment avec l'emploi des ampoules d'oxalate d'uranium, l'usage de cellules photoélectriques, montées en brillancemètre, et reliées à des dispositif enregistreurs.

Signalons qu'enfin en 1951, la mission forestière de la F.A.O. (Food and Agriculture Organization) a commencé des études photométriques sur la régénération des plants d'acajou d'une très grande valeur marchande, en Amérique Centrale et spécialement aux Antilles Françaises. Elle utilise un photomètre Weston, et procède par la méthode photométrique instantanée que nous avions décrite pour les peuplements résineux du Haut-Doubs.

Nous avons nous-même employé depuis 1946 des cellules photoélectriques L.M.T. à deux sensibilités, ainsi qu'il sera dit plus loin, en les montant en brillancemètre. Par ailleurs, nous employons également depuis 1952 un luxmètre L.A.P. à 3 sensibilités, muni d'un filtre réducteur gris neutre transmettant 1/20 de la lumière incidente.

Il est à noter que, d'après l'Ingénieur de la maison L.A.P. qui a établi ce filtre, la mise au point de tels dispositifs réducteurs offre certaines difficultés, justement en raison des fluctuations qu'ils présentent en ce qui concerne le facteur de transmission, ceci suivant l'intensité de l'éclairement. Cet ingénieur vient du reste de réaliser un filtre qui ramène exactement la sensibilité de la cellule à celle de l'œil (coïncidence des courbes des figures 2 et 11). Nous avons même envisagé avec lui d'utiliser des filtres qui donneraient à la cellule la même courbe de sensibilité que la plante elle-même, ou plus simplement qu'une solution de chlorophylle (voir figure 8). Les filtres Kodak Rose Bengal n° 30 ou Minus green n° 31 donneraient des solutions déjà approchées.

E. - Les actinomètres

Nous désignons sous ce terme général tous les appareils établis en vue de mesurer la radiation globale, c'est-à-dire, non seulement directe du soleil, mais diffusée par le ciel bleu et les nuages. On peut distinguer très sommairement :

a) Les appareils du type « thermomètre » dans lesquels deux

thermomètres, l'un blanc, l'autre noir, sont exposés au rayonnement à mesurer. De la différence d'absorption traduite par une élévation différente de température, on déduit l'intensité de la radiation (appareils d'Arago et de Violle). Ces appareils doivent être lus fréquemment, ou être munis de dispositifs enregistreurs.

b) Les appareils à distillation dans lesquels un liquide volatil, contenu dans une enveloppe de verre sur laquelle se concentre la radiation, se met à distiller et se condense dans un tube gradué à température inférieure. Ces appareils sont totalisateurs, c'est-à-dire qu'ils enregistrent, sans la détailler, la radiation totale reçue (Type Bellani - Angstrom - Wilson).

c) Les appareils à résistance, dans lesquels deux fils de platine, soumis à des portions différentes de la radiation, s'échauffent différemment et prennent des résistances électriques différentes. Un pont de Wheatstone permet de mesurer les valeurs de ces résistances, donc de la radiation reçue (Type Callendar Recording Pyrheliometer). Ces appareils doivent être enregistreurs.

d) Les appareils à pile thermo-électrique qui sont les plus répandus, et qui utilisent la force électro-motrice qui naît de l'échauffement différent de deux métaux d'un couple thermo-électrique (Or-platine) (Manganine-constantan), etc... Ces appareils doivent également être enregistreurs. Ils ont donné lieu à de multiples réalisations (Solarigraphe de Gorczynski — de Volochine — Pyranomètre d'Angstrom, etc...).

Il y a près d'un siècle que les premiers de ces appareils étaient mis au point, mais leur utilisation forestière est beaucoup plus récente. Boysen Jensen, qui a consacré une partie de son existence à ces recherches, employait un actinomètre « Wunneschen » d'un type que nous ne pouvons définir (1910). Il trouva les valeur suivantes, pour la radiation relative sous divers couverts :

Epicéa	1 %
Hêtre	1,8 %
Chêne	11 %
Frêne	13,6 %
Bouleau	25,7 %

En 1929, Oudin, à la Station de Recherches de l'Ecole Nationale des Eaux et Forêts de Nancy, employa 6 actinomètres de Bellani, l'un à l'extérieur, les autres sous des peuplements de consistances diverses de la forêt feuillue de Haye, près de Nancy. Les résultats obtenus donnent de 3 à 5 % sous des peuplements jeunes et serrés, à 18 et 25 % dans des parcelles entr'ouvertes. Les observations ont été effectuées du 1er juillet au 30 septembre 1929. Ce sont, à

notre connaissance, les premières observations actinométriques en forêt, qui aient été effectuées en France.

R.-P. Gast, en 1930, se servit de 3 actinomètres enregistreurs du type « Massive base radiometer », dont le principe est celui de la pile thermo-électrique citée plus haut. Ces appareils sont très peu sélectifs puisqu'ils enregistrent des radiations qui vont de 0,29 μ (extrême ultra-violet) à 2,5 μ (très loin déjà dans l'infra-rouge). D'après l'expérimentateur, ces appareils présentent cependant les défauts suivants : infidélité pour les hauteurs du soleil voisines du zénith — retard dans les transmissions — présence de la vapeur d'eau sous le verre protecteur qui atténue le facteur de transmission de celui-ci. Ces trois appareils furent placés dans un peuplement de pins Weymouth, pur, en trois points différents : couvert moyen - couvert léger - clairière, à côté de plants naturels de même essence. Les appareils furent observés pendant 105 jours, de mai à septembre. Voici les résultats enregistrés, comparativement aux croissances des jeunes plants observés :

Couvert estimé approximativement à l'œil	85 %	40 %	Nul
Radiation moyenne totale en petites calories/cm²/jour	123 —	256 —	450
% de la radiation par rapport au plein découvert	27 % (33 à 25)	57 % (78 à 40)	100 %
Croissance relative moyenne par rapport à celle du plein découvert (longueur de la pousse annuelle)	26 %	63 %	100 %

La proportionnalité est ici très nette.

Par ailleurs, dans chaque couvert donné, l'auteur a constaté une diminution continue de la radiation relative par rapport au plein découvert de mai à septembre. Il l'attribue à la baisse du soleil sur l'horizon. Ceci n'est valable que pour la période qui suit le 21 juin. Auparavant, il faut sans doute incriminer la pousse annuelle qui augmente l'importance du couvert. Par ailleurs, on peut faire certaines critiques sur le point de référence choisi pour le couvert nul. Il s'agissait, semble-t-il, d'une trouée de 30 m × 60 m, entourée d'arbres de 25 mètres de hauteur. L'appareil de référence était placé au milieu de la trouée. On peut penser qu'il n'enregistrait pas, tout le long du jour, la même radiation que celle obtenue en rase campagne. Les rapports seraient donc légèrement erronés.

Shirley, en 1932, utilisa également des piles thermo-électriques pour des mesures instantanées répétées (10 par parcelle) par temps

ensoleillé clair. Il obtenait ainsi des valeurs moyennes de rayonnement relatif par rapport au plein découvert. Son but était d'obtenir une relation entre cette dernière donnée et la croissance annuelle des jeunes plants de Pins Weymouth, de Banks et rouge. Voici les chiffres extraits du graphique qu'il donne :

Radiation relative	Longueur de la pousse (en pieds anglais)
25 %	1
50 %	2
75 %	3
100 %	4

Cette correspondance, trop satisfaisante à notre avis, est sans doute schématisée.

L'intérêt de l'étude de SHIRLEY réside également dans l'abondante bibliographie qu'il a réunie, et que nous avons, en partie, utilisée.

Lors d'une mission au Sénégal, en 1933-1934, TROCHAIN a effectué des séries de mesures extrêmement intéressantes, grâce à un solarimètre à pile thermo-électrique RICHARD-GORCZYNSKI, muni de trois filtres fournis par le constructeur : Verre rouge d'Iéna pour la partie rouge et infra-rouge, Verre de marbre, laissant passer seulement les infra-rouges, Verre violet de SCHOTT laissant filtrer seulement les ultra-violets et le violet. Des mesures furent effectuées en plein découvert, et dans diverses formations végétales, savanes, clairières et sous-bois. Nous n'avons pas connaissance d'un tel travail effectué, en France, sous des peuplements forestiers par exemple, et il y serait sûrement très utile.

En 1941, HAGENE étudia la radiation reçue sous un arbre isolé grâce à deux piles thermo-électriques de VOLOCHINE avec dispositif d'enregistrement toutes les minutes. Un appareil était situé sous un arbre isolé — l'autre en plein découvert. Les résultats sont donnés par comparaison des chiffres du premier et du second.

Les relations apparaissent comme très complexes. Autour d'une moyenne générale, pendant la période assez courte d'observations de 12 jours, de radiation relative de 1/2,25 on a, par temps couvert égal (lumière diffuse) 1/1,65, 1/1,76, etc... ; par temps ensoleillé clair 1/2,30, 1/2,48, etc... L'étude est accompagnée de considérations astronomiques sur l'ombre portée d'une cime d'arbre aux diverses époques de l'année.

En 1948, WELLNER a repris des mesures sous des pins Weymouth, avec un actinomètre mis au point par SHIRLEY.

Par ailleurs, nous indiquerons, un peu plus loin, que nous avons employé de façon continue, du 1er mai au 30 septembre 1951, et à partir du 1er mai 1952, des actinomètres de BELLANI, à boule blan-

che et bleue, dans des stations de plein découvert, et sous des peuplements divers du Haut-Doubs.

*
* *

En somme, de cette revue générale des appareils employés, on peut conclure que la plus grande diversité a présidé et préside encore actuellement, au choix des procédés adoptés. Même de nos jours, les chercheurs utilisent des moyens aussi dissemblables que le simple papier photographique, dont nous avons montré les défauts, le photomètre à source lumineuse constante lourd et peu maniable, les cellules photoélectriques, commodes mais parfois imprécises, et les actinomètres délicats, où le moindre défaut et la moindre cause d'imperfection sont analysés avec le plus grand soin. Cette simple considération suffirait à expliquer les résultats parfois notablement différents qui sont obtenus dans des cas pourtant très semblables : qu'il s'agisse d'évaluer la lumière ou la radiation régnant dans le milieu forestier, ou ses effets sur la végétation d'une espèce déterminée. On pourrait souhaiter, afin de rendre comparables les résultats des recherches, qu'un certain nombre de méthodes types soient sérieusement étudiées, et recommandées à tous ceux qui s'occupent de cet important problème.

F. - Autres études sur la croissance des plants forestiers

Nous rangerons dans ce paragraphe des travaux qui se basent uniquement sur des considérations d'ordre statistique, astronomique, ou météorologique, ceux qui utilisent la simple référence à des appréciations qualitatives sur la lumière incidence, enfin ceux, et ils sont nombreux, qui se réfèrent aux résultats de mesures effectuées avec des appareils sur lesquels nous n'avions pas de renseignements précis.

Signalons d'abord une étude théorique effectuée en 1860 par d'Arbois de Jubainville, Garde Général des Eaux et Forêts, près de Nancy ; ce dernier s'est efforcé, en se basant uniquement sur des considérations astronomiques, de déterminer l'importance de l'ombre portée des cimes des grands arbres de réserve dans les taillis-sous-futaie. Puis, il a tenté d'établir une relation avec la croissance des végétaux sous-jacents. Voici, en gros, les résultats :

Quand l'on considère un arbre de réserve isolé de 120 m^2 de couvert, on trouve, dans la zone surplombée par la cime, une production du taillis de 2,50 m^3 par ha et par an. Dans la zone balayée par l'ombre de la cime, mais non surplombée par elle, la production du taillis devient 4,01 m^3 par ha et par an. Enfin, en dehors de toute action de la cime, la production normale est de 5,59 m^3 par ha et par an.

Dans deux coupons voisins de la même forêt, sur sol identique et d'âge très semblable, quand le couvert des réserves représente 35 % de la surface totale, la production du taillis sous-jacent est de 3,52 m^3 par ha et par an; quand elle en représente 77 %, la production n'est plus que de 1,81 m^3. Voilà des relations très nettes.

Bien plus récemment, H. Perrin (1946), dans une étude statistique d'ensemble sur les taillis-sous-futaie, souligne que le développement de l'importance des réserves a contribué très probablement à la régression des chênes rouvre et pédonculé, constatée actuellement dans presque tous les peuplements de ce genre.

Cette conclusion, qui ressort de l'examen de plusieurs milliers de documents réunis en particulier par l'Inspecteur des Eaux et Forêts de La Hamelinaye, prend ainsi une valeur peu discutable. Or, l'effet le plus évident de l'augmentation des réserves des taillis-sous-futaie est de diminuer l'éclairement au sol et, comme il est admis que le chêne, surtout pédonculé, est une essence qui exige une pleine lumière, on explique facilement sa régression quand l'ombre s'étend trop sur lui. H. Perrin préconise des trouées de 20 à25 m de diamètre, ce qui, avec des arbres bas et branchus de taillis-sous-futaie, donnerait, d'après nous, en théorie, un éclairement relatif au centre de l'ordre de 50 %.

Des discussions s'engagent du reste entre de nombreux et célèbres auteurs forestiers (Lorentz, Bagneris, Broilliard, Boppe, Huffel) sur l'importance relative du feuillage, nuisible par son ombre portée, des réserves suivant leur grosseur et leur hauteur. H. Perrin souhaite donc que « des mesures photométriques précises » soient effectuées pour départager ces auteurs. Bien entendu, nous ne pouvons que nous rallier complètement à cette suggestion, susceptible d'apporter des précisions très intéressantes sur un problème que l'on a envisagé, jusqu'à présent, sous une forme plus qualitative que quantitative.

Silvy-Leligois, dans une brillante étude sur « le forestier entre l'ombre et la lumière » (1950), expose avec originalité comment la conduite des opérations de sylviculture peut décider de l'évolution des peuplements, et reprend un certain nombre d'exemples typiques qui montrent ce balancement entre le développement des essences d'ombre et de lumière, suivant que le raisonnement, l'intuition ou tout simplement la mode a favorisé un état plus ou moins serré des massifs.

Après ces études générales, émanant de spécialistes français des questions forestières, et basées sur cette série de faits qui est, comme nous l'avons dit, admise de tous les sylviculteurs, nous allons passer en revue quelques effets plus spéciaux où la croissance de végétaux forestiers est liée aux manifestations de l'activité solaire.

Boiko (1947) étudiant la répartition d'un chêne: *Quercus aegilops*, en Palestine, estime que cette essence prospère seulement dans les stations où l'insolation atteint 170 000 à 210 000 calories par cm^2 et par

an. Ce chiffre semble très élevé, étant donné que la station d'observation la mieux insolée du globe (Pasadena) reçoit 165 000 calories par an. (Paris, environ 100 000).

L'influence de la période undecennale d'activité solaire a donné lieu à de multiples observations. Esclangon (1943-1945) estime que le lien est très net. Huber (1948) et surtout Bulli (1949) et Vercelli (1949) établissent une relation entre « l'onde undecennale d'accroissement » du pin de Ravenne et du *Sequoia gigantea*, et les périodes d'activité solaire.

Il n'est pas jusqu'à la lune dont l'influence n'ait été étudiée d'abord par Heyer (1852), Balatine (1872) et, d'une façon nettement plus scientifique, par Elizabeth Semmens (1947), qui attribue à l'influence de la lumière polarisée, maximum dans certaines phases de la lune, un accroissement de la germination et une augmentation du taux du sucre dans la sève.

Pour revenir à des effets plus précis, nous allons signaler brièvement une série de recherches intéressant l'influence de la lumière sur des points déterminés de la physiologie végétale dans le milieu forestier :

a) **Germination**

Shirley (1945) et Baker (1950) estiment que la lumière favorise la germination de nombreuses graines.

Stoutemyer et Close (1946) pensent qu'une certaine proportion de lumière bleue est nécessaire à la germination.

Sarvas (1950) a constaté également que les graines de pin sylvestre, d'épicéa commun et de bouleau verruqueux germent plus vite à la lumière qu'à l'obscurité.

P. Chouard, en 1951, a fait un exposé complet de la question, dans l'état actuel de nos connaissances. Il distingue les plantes dont la germination est favorisée par la lumière (photo-sensibles) et qui représentent la majorité des espèces (70 %) : « un centimètre de terre suffit à créer les conditions défavorables à la germination » — celles qui sont indifférentes, de ce point de vue, à l'influence de la lumière (5 % des espèces) — et enfin celles qui germent bien à l'obscurité (scotosensibles) et qui représentent environ 25 % des espèces ; pour ces dernières, une faible lumière peut réduire ou arrêter complètement la germination. Il y a malheureusement peu de renseignements sur les graines forestières ; dans la nature, beaucoup de ces semences tombent à même le sol, et germent souvent très bien dans ces conditions : elles seraient donc plutôt photosensibles. Du reste, la classification ci-dessus peut être modifiée par de multiples facteurs (conservation - téguments - oxygène - température - substances dissoutes, etc...).

La question de l'influence de la composition de la lumière est également exposée par P. Chouard ; d'après les expériences de Flint et Allister, ce seraient plutôt les radiations rouges, orangées et jau-

nes, qui favoriseraient la germination de certaines graines photosensibles.

Bien du reste qu'un peu accessoire à notre sujet, il ne nous paraît pas inutile d'indiquer qu'à la même occasion, l'auteur fait un assez large exposé au sujet des « blastokolines » et des « inhibiteurs de germination » secrétés en particulier par les radicelles de nombreuses plantes, et qui seraient peut-être responsables des phénomènes d'alternance constatés par de nombreux forestiers entre l'épicéa et le sapin — l'épicéa et le hêtre, etc...

Ces découvertes récentes sont à rapprocher des considérations développées il y a plus d'un siècle à l'occasion du Congrès Forestier de Baden, et où il fut affirmé que les radicelles des plants forestiers secrétaient des substances nuisibles aux jeunes plants de même espèce, affirmation qui rencontra alors un grand scepticisme.

b) Croissance des plants, des feuilles et des aiguilles

Les publications sont ici très nombreuses : nous en avons cité une bonne partie à propos des instruments étudiés en particulier plus haut.

Olsen (1942-1945) étudie les variations de la teneur en chlorophylle des feuilles de hêtre, en fonction de la lumière, les feuilles de soleil, bien insolées, étant plus riches que les feuilles d'ombre.

Kossowich (1945) a vérifié, dans les forêts de sapin éclaircies, une augmentation très sensible de la photosynthèse en relation avec l'apport supplémentaire de lumière.

Blackmann et Wilson (1951) établissent une relation logarithmique entre le taux net d'assimilation et l'intensition de la lumière.

De multiples études soulignent l'influence très heureuse, sur l'activité photosynthétique, d'une action combinée eau-lumière (Shirley), d'un apport artificiel d'air (Decker), des pulvérisations d'oligo éléments (Richter et Wassilieva).

Une série de travaux se rapportent plus spécialement aux résineux croissant dans l'Est de la France, et nous en donnons un résumé ci-après. Engler, dès 1908, signalait que des mesures effectuées sur les aiguilles de sapin et d'épicéa montraient que les premiers possédaient une surface foliacée double de celle des seconds, pour une même dimension de tronc et une même classe d'arbre. Constatation à rapprocher du fait bien connu que le sapin croît mieux à l'ombre que l'épicéa, nous l'avons déjà dit.

Stafelt (1925) a étudié spécialement les aiguilles d'épicéa. Il trouve que les aiguilles de lumière de cette essence présentent une assimilation chlorophyllienne croissante en même temps que la lumière, et ceci jusqu'au maximum de celle-ci. Lorsque l'aiguille vieillit, elle devient plus sensible à la lumière et atteindrait son activité maximum vers 30 % d'intensité par rapport au plein découvert. Les aiguilles d'ombre auraient aussi leur maximum de sensibilité vers 30 %,

climat lumineux qui règne par ailleurs à l'intérieur des cimes d'épicéa. Les aiguilles d'épicéa auraient une quantité de chlorophylle égale à 11 % environ de leur poids (25 % dans le cas du chêne). Mais le poids absolu d'aiguilles existant sur un hectare de pessière étant très supérieur au poids de feuilles de un hectare de chênaie, la supériorité de photosynthèse existe en faveur du premier peuplement. Ceci concorde avec les estimations d'Engler, qui pense qu'un hectare de peuplement d'épicéa de 50 ans possède une surface d'aiguilles de 12,8 ha. alors qu'un hectare de hêtraie de même âge n'aurait qu'une surface foliacée de 5,60 ha. Par ailleurs, Kramer et Walter trouvent pour un pin d'Amérique du Nord (*Pinus taeda*), une photosynthèse analogue à celle de l'épicéa, croissant jusqu'à la pleine lumière.

Ivanoff et Kossowich (1929) ont observé l'activité relative des diverses aiguilles d'épicéa. A 4 % de lumière relative, c'est l'aiguille d'ombre qui travaillerait le plus. En lumière diffuse d'un jour normal, les aiguilles d'ombre et de soleil travaillent également. Enfin, par jour très ensoleillé, ce sont les aiguilles de lumière qui fonctionnent le plus activement.

Alvik (1939) s'est penché sur le problème de l'assimilation chlorophyllienne aux basses températures. En plein hiver, à —8° ou —10°, le sapin et l'épicéa présentent un bilan positif (assimilation supérieure à la respiration) à condition d'avoir une faible lumière de 2 500 à 3 000 Lux. En été, le bilan est presque toujours positif (1).

c) **Développement des racines**

Stoutemyer et Close, déjà cités, estiment que les radiations orangées et rouges favorisent le développement des racines.

Barney (1951) a étudié un effet général de la lumière sur la croissance des racines de pins. Il faudrait au minimum 2 000 à 3 000 Lux pour que cette croissance se manifeste.

d) **Végétaux concurrents**

Watt a étudié l'influence des divers facteurs écologiques sur l'installation de la grande fougère.

Olmsted Nordwood et James D. Curtis (1947) ont trouvé que la ronce produit dans les cas favorables plus de 28 millions de graines par ha, et que, au moins 1 million 1/2 peuvent germer. Les forestiers du Jura admettront ces chiffres sans difficulté.

(1) R. Schnell (1942) étudie, du seul point de vue qualitatif, l'influence de l'ombre et de la lumière sur la structure des rameaux d'épicéa. Il constate, avec de nombreux forestiers du reste, que l'ombre réduit en particulier la longueur des pousses qui peuvent même avorter complètement, modifiant la structure des branches et même de la cime. Sa conclusion, basée sur plusieurs centaines d'observations, est que « la morphose d'ombre s'accompagne d'une atténuation de la structure de cime »

DEUXIÈME PARTIE

CONSIDÉRATIONS THÉORIQUES SUR LA RÉPARTITION DE LA LUMIÈRE EN FORÊT

Une remarque préliminaire s'impose, en ce qui concerne la valeur exacte des termes employés dans cette étude. Toutes les fois que nous envisageons des problèmes généraux, le mot « lumière » est pris dans un sens large, et comprend à la fois les radiations visibles, les infra-rouges et les ultra-violets.

Par contre, lorsque nous comparons des instruments, des mesures ou des effets divers qui se rapportent plus spécialement aux radiations visibles, ou au contraire aux radiations globales, nous nous sommes efforcé de réserver le terme de « lumière » aux premières, et le terme de « radiation » aux secondes.

Ce petit problème est du reste assez délicat, et d'éminents spécialistes de la photométrie n'échappent pas toujours, sur ce point, à une certaine confusion.

Par ailleurs, nous avons conservé, dans tous les exposés, les termes anciens de « brillance » et de « bougie », qui sont bien connus et définis — alors que depuis juin 1948, les mots exacts à employer seraient respectivement « luminance » et « candella ».

*
* *

Le milieu forestier, considéré comme un système optique, peut être envisagé en considérant principalement les deux éléments suivants :

— la source lumineuse d'où émanent les rayons étudiés, et l'écran qui modifie plus ou moins intensément ceux-ci, en quantité et en qualité.

1° La source lumineuse

On peut distinguer deux cas extrêmes :

Le ciel uniformément couvert, qui agit comme un diffuseur plan égal (caractérisé par une grande variété dans la direction des rayons lumineux, et une égalité relative dans leur intensité) et le ciel pur, où,

au diffuseur qu'il constitue, se superpose le soleil, source supplémentaire mobile de lumière dirigée. Entre ces cas extrêmes, on peut placer tous les intermédiaires : ciel plus ou moins nuageux avec soleil apparent ou caché.

Le cas où le soleil n'est pas visible est assez fréquent puisqu'il représente, pour le Nord-Est de la France, 60 % environ de la durée totale possible des heures d'insolation. Par ailleurs, lorsque le soleil brille, une certaine proportion de la lumière totale (25 % très approximativement) provient cependant du ciel sous forme de lumière diffusée. WIESNER qui, l'un des premiers, s'est préoccupé de ces problèmes, estime par ailleurs que le soleil intervient très peu pour assurer directement la croissance des végétaux, mais qu'il joue surtout un rôle en créant une vaste plage lumineuse (le ciel), qui répand en tous sens la lumière diffuse, indispensable à la végétation. C'est dire l'importance de ce facteur qui a été, jusqu'ici, assez négligé, dans toutes les études théoriques relatives à l'éclairement d'une station, études qui ont plutôt mis l'accent sur l'insolation directe.

Pour fixer les idées, nous pouvons extraire de divers travaux de FABRY et de MAURAIN, les chiffres suivants :

— Eclairement en plein air sans soleil : 1 000 à 40 000 Lux.
— Eclairement en plein soleil, en été, à midi : 100 000 Lux.
— Eclairement maximum en dehors de l'atmosphère : 130 000 Lux.

Composition indicative de l'éclairement total d'après KIMBALL

	Soleil	Ciel	Moyenne
	—	—	—
Ciel sans nuage	74 %	26 %	65 500 Lux.
Ciel nuageux	52 %	48 %	65 300 Lux
Ciel couvert	0 %	100 %	21 500 Lux.

2° L'écran

Lorsque les rayons lumineux tombent sur la cime des grands arbres, une partie est renvoyée, et cette réflexion sélective constitue la couleur du couvert — une partie est transmise au sol, avec ou sans modification — une partie enfin est absorbée, et c'est elle qui assure en particulier le fonctionnement de l'acte photosynthétique.

A titre de simple indication, disons qu'un couvert résineux dense de sapin ou d'épicéa (400 tiges par hectare), renverrait approximativement 15 % de la lumière incidente, en laisserait passer 5 %, et en absorberait donc environ 80 %. Pour les feuillus, qui paraissent plus clairs, surtout au printemps, la proportion renvoyée atteindrait au moins 25 %, celle transmise 5 %, et celle absorbée donc 70 %. La

Les cimes et les fûts constituent un écran complexe pour les rayons lumineux.

(Cliché STAINACRE, Pontarlier.)

difficulté commence en cette matière, lorsque l'on veut déterminer le coefficient de transmission du couvert :

$$T = \frac{F_T}{F_O}$$

rapport du flux lumineux transmis F_T dans le sous-bois au flux lumineux total incident F_O.

Si la lumière avait toujours la même composition, la même direction, et variait seulement en intensité, on pourrait admettre en théorie une constance du facteur T, et celui-ci caractériserait photométriquement et de façon définitive un couvert déterminé (Ceci, bien entendu, à une époque donnée de son développement foliacé). Mais l'intervention du soleil mobile introduit, en particulier, immédiatement une cause de variabilité qui rend illusoire la recherche d'un tel coefficient de transmission constant dans tous les cas.

On peut cependant penser que, si l'on considère le cas de la lumière diffuse (temps couvert bien égal, sans vent, par nuages élevés) on aura aussi bien du point de vue photométrique théorique que du point de vue observation pratique (mesure de lumière relative instantanée), les conditions optima pour déterminer théoriquement et expérimentalement un facteur de transmission T du couvert, qui restera assez constant, quelle que soit l'intensité de cette lumière. Nous avons déjà signalé que l'on arrive à un tel résultat dans les futaies résineuses du Haut-Doubs, et W. Nægeli, en Suisse, sous des couverts résineux et feuillus, obtient les mêmes conclusions.

Par contre, si l'on fait intervenir le soleil (temps clair toute la journée), aux considérations théoriques d'ordre photométrique, devront se superposer des considérations astronomiques sur le mouvement apparent du soleil — et les résultats des mesures instantanées effectuées ne permettront sûrement pas de retrouver, à chaque instant, le facteur T défini plus haut. Si le temps devient instable, les choses se compliquent encore. Mais, il est possible que, la valeur de l'éclairement instantané en un point donné faisant jouer de multiples facteurs en tous sens, les différentes valeurs T_1 - T_2 - T_3, etc... trouvées, se répartissent suivant la courbe classique de Gauss autour du facteur T. Un tel groupement autour d'une valeur moyenne ressort du reste des courbes de fréquence établies par W. Nageli, et nous même dans le Haut-Doubs sous des couverts résineux et feuillus. On relève, par ailleurs, une certaine concordance entre les mesures actinométriques continues (5 mois) faisant intervenir des types de temps très variés, et les mesures photométriques instantanées par temps couvert. Ceci demanderait, du reste, à être confirmé.

Nous allons donc examiner uniquement les deux cas extrêmes envisagés plus haut :

— le temps nuageux bien égal et le temps pur ensoleillé.

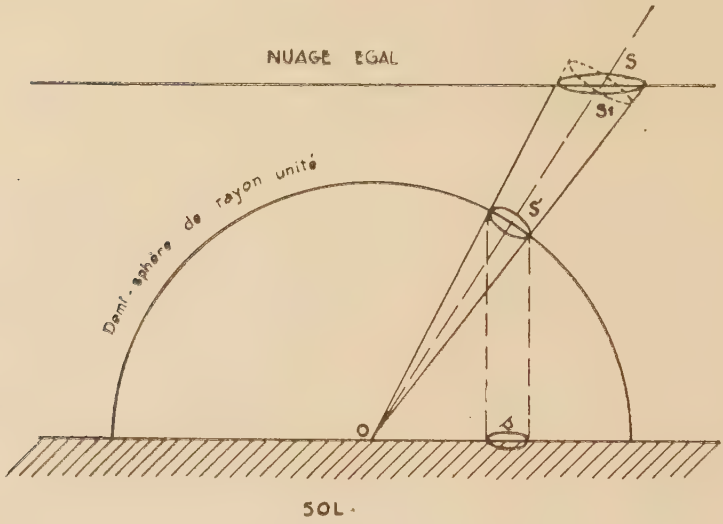


FIG. 15.

Demi-sphère de référence.

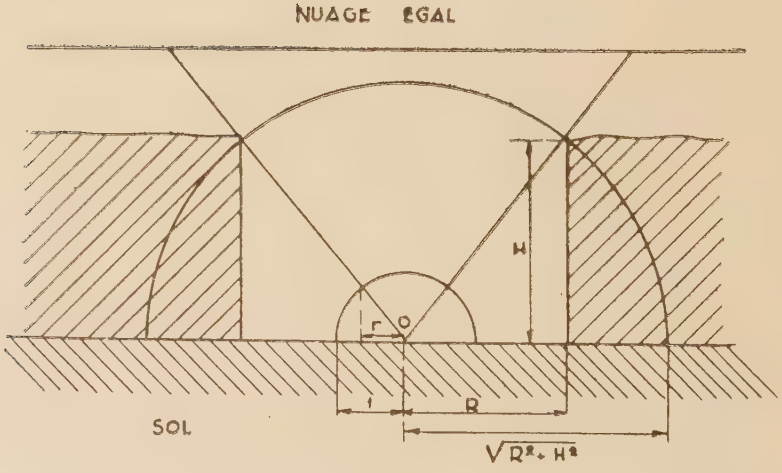


FIG. 16.

Formule de la trouée circulaire.

$$Er = \frac{R^2}{R^2 + H^2}$$

A. - Le temps nuageux bien égal

Considérons un point O sur un sol horizontal, surmonté d'un nuage horizontal très grand de brillance bien égale, jouant le rôle d'un diffuseur plan, et une surface S, très petite, prise sur ce nuage (fig. 15). On peut imaginer une demi-sphère de référence de centre O et un plan tangent sur lequel la surface S sera projetée en S'. Cette demi-sphère correspond du reste très bien à l'idée de « voûte céleste », de « dôme de verdure », entrée depuis longtemps dans la conception usuelle. On peut démontrer assez facilement, et, pour abréger nous ne referons pas cette démonstration, que, si l'on considère une demi-sphère de référence de rayon unité, et que si l'on projette à nouveau orthographiquement S' en s, sur le plan horizontal passant par O, l'éclairement en O est égal à s. B (B étant la brillance de la surface S, ou le rapport entre l'intensité lumineuse émise dans la direction OS et la surface SI de S, normale à OS).

e (en lux) = s (en m^2). B (en bougies par m^2) pour R = 1 m.

Si l'on considère la surface entière du nuage, elle se projette sur toute la demi-sphère et finalement sur le cercle, intersection de celle-ci avec le plan horizontal. On a alors :

$$E = \pi R^2 . B = \pi . B$$

On peut donc simplement déterminer l'éclairement total en un point O, en plein découvert, connaissant la brillance de la nappe nuageuse qui le surplombe. La plupart du temps, du reste, on n'a que peu d'idées sur B. Sa valeur, d'après FABRY, correspond à des chiffres variables allant de 1 000 à 10 000 bougies par mètre carré, donnant donc des éclairements théoriques de 3 141 Lux à 31 416 Lux.

Mais ce qui nous intéresse est l'éclairement relatif, et si l'on considère (voir fig. 16 et 17) par exemple, une trouée circulaire dans un peuplement dont la projection découpe une calotte dans la demi-sphère de référence, l'éclairement relatif Er en O devient simplement égal *au rapport* de la projection orthographique de cette calotte sur le plan horizontal p, au cercle, intersection de la demi-sphère de référence avec le même plan, P.

Dans ce cas :

$$Er = \frac{\pi . B . R^2}{\pi . B (R^2 + H^2)} = \frac{R^2}{R^2 + H^2}$$

R étant le rayon de la trouée circulaire de centre O, et H la hauteur totale des arbres voisins par rapport au plan horizontal. *C'est la formule de la trouée circulaire.*

On peut établir une courbe représentative de cette fonction en exprimant R en fonction de H. On a comme cas simples :

$$R = H/2 \qquad Er = 20\ \%$$
$$R = H \qquad Er = 50\ \%$$

Au-dessus de R = 2H, on a un éclairement relatif de plus de 80 %, et l'on gagne peu de choses à augmenter le rayon de la trouée.

Bien entendu, cette démonstration s'applique *à toutes les formes de trouées,* mais la détermination de la projection sur le plan horizontal peut être plus ou moins aisée selon le cas. On peut également se proposer de calculer l'éclairement relatif sur l'un des bords d'une trouée. La construction est relativement facile, dans le cas d'une forme circulaire, et l'on trouve que, photométriquement, si R = H/2, l'éclairement relatif sur tout le pourtour (puisque nous raisonnons dans le cas d'un éclairement supposé égal) est d'environ 14 %, soit près des 3/4 de l'éclairement relatif au milieu de la trouée. Les courbes isophotes sont des circonférences concentriques à O. A l'intérieur du peuplement, l'éclairement relatif ne s'annule en théorie qu'à l'infini.

Si maintenant nous considérons un peuplement composé d'arbres dont les cimes seraient circulaires, plates et opaques, on pourrait, en admettant une relation simple entre le diamètre des cimes et celui des troncs (formule de Gazin, par exemple) (1) déterminer l'éclairement relatif théorique. En effet, la surface lumineuse serait réduite dans la proportion où les cimes l'obscurciraient, et la projection de la demi-sphère de référence sur le plan horizontal maintiendrait le même rapport. On aurait, par exemple, pour 3 peuplements de 500 m^3/ha, en tarif Algan 14 (2) :

Arbres de 2 m de circ. à 1,30 m du sol : 194 tiges par ha : Er = 25 %
Arbres de 1,40 m de c. à 1,30 m du sol : 227 tiges par ha : Er = 20 %
Arbres de 1 m de circ. à 1,30 m du sol : 555 tiges par ha : Er = 1 %

En réalité, ces cimes ont une épaisseur, ce qui réduit beaucoup la distance à partir de laquelle les plages lumineuses cessent d'être efficaces, et, à l'inverse, elles ne sont pas complètement opaques. Par ailleurs, les troncs, dont nous n'avons pas tenu compte, interviennent dans les deux sens (interception des rayons lumineux — ou réflexion de ceux-ci).

(1) D'après la loi de Gazin, une cime normalement développée s'étend sur une largeur de 15 fois le diamètre du fût (futaie). Dans le cas des réserves de taillis-sous-futaie, la cime est normalement plus développée.

(2) Les tarifs Algan sont des barèmes simplifiés de cubage qui donnent, en fonction du diamètre (ou par transposition, des circonférences), le volume total (tige et branchanges) des arbres. Ils sont numérotés de 1 à 20 et l'on choisit celui qui semble convenir le mieux à chaque massif. Le tarif Algan 14 correspond, pour les résineux, à une forme déjà satisfaisante.

Nous indiquerons plus loin que, pour les sapins et épicéas, des observations photométriques instantanées conduiraient plutôt à une formule empirique de la forme : Er = K/N, K étant ici égal à 20 environ, et N étant le nombre des arbres à l'hectare. Cette formule semblerait être confirmée par les résultats d'observations actinométriques continues pendant 5 mois en 1951.

B. - Le temps pur ensoleillé

Il faut, ici, ajouter à l'action d'un diffuseur égal (ciel) l'intervention du soleil mobile, dont la course apparente, projetée sur la demi-sphère de référence, varie chaque jour. Le problème est bien plus complexe car, à l'éclairement du ciel qui peut, pour simplifier, être supposé assez constant dans toutes les directions, à un moment donnée, se superpose l'éclairement mobile du soleil, de valeur en moyenne trois fois plus forte, et dont les rayons sont dirigés. L'intensité I du rayonnement solaire sur un sol horizontal dépend de la masse d'air traversée, et de l'inclinaison des rayons sur ce sol.

$$I = I_o . p^m . \sin. h,$$

formule dans laquelle I_o est l'intensité en dehors de l'atmosphère, soit environ 120 à 130 000 Lux, p le coefficient de transparence de l'atmosphère de l'ordre de 0,75 très approximativement, m la masse d'air traversée selon la hauteur du soleil sur l'horizon, et allant de 1 pour le soleil au zénith, à 2 pour une hauteur de 30° et à 6 pour une hauteur de 10° ; h enfin, la hauteur du soleil au-dessus de l'horizon, complément de la distance zénithale z.

Notre demi-sphère de référence peut cependant nous être d'un précieux secours. Si nous projetons (voir fig. 17 et 18) la série des trajectoires solaires sur le plan horizontal, en nous bornant ici à indiquer les deux trajectoires extrêmes (solstices) et la trajectoire moyenne (équinoxes), avec le tracé des fuseaux horaires, nous avons une figure extrêmement utile qui d'un seul coup d'œil, peut nous donner des indications sur le temps d'insolation directe possible dans une trouée donnée.

Nous proposons de l'appeler « cercle d'illumination totale ». Il est établi ici pour une latitude de 45°, et son tracé n'est qu'approximatif, la détermination des trajectoires par point étant assez longue et forcément imprécise.

R. Pers, qui a étudié ces problèmes dans une très intéressante thèse présentée à la Faculté des Sciences de Paris en 1937, utilise la projection des trajectoires solaires sur le plan de l'équateur céleste (ligne des pôles au centre). De cette façon, les trajectoires solaires deviennent des cercles, et les angles horaires sont égaux. Tou-

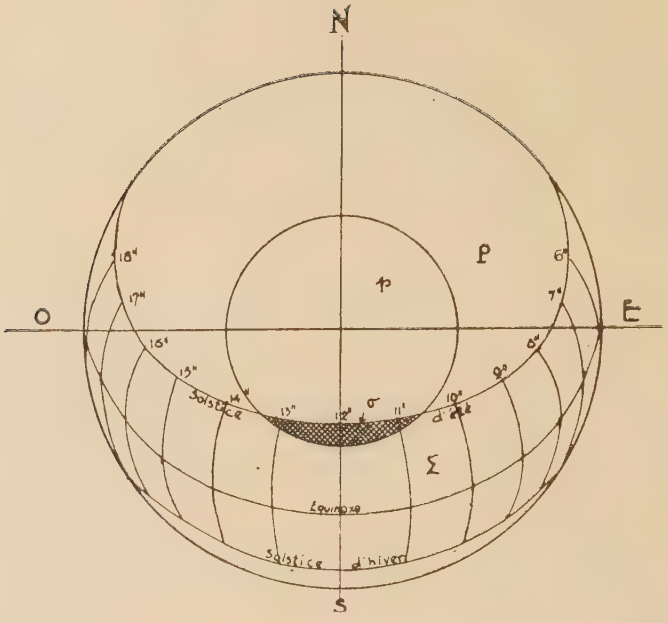


Fig. 17.
Cercle d'illumination totale.
Trouée circulaire - Latitude 45°.

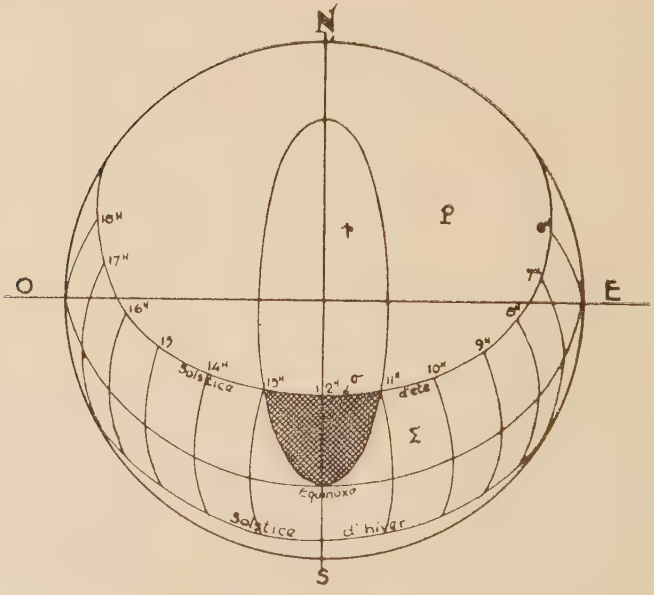


Fig. 18.
Cercle d'illumination totale.
Trouée elliptique - Latitude 45°.

tefois, la projection des divers obstacles qui arrêtent les rayons solaires est assez longue à établir dans ce système, et l'auteur a mis au point un appareil extrêmement ingénieux, dit « hélioramique », qui donne directement, en projection de LAMBERT sur le plan de l'équateur céleste, l'image de ces obstacles. Comme nous n'avons pas besoin d'une grande précision, nous avons utilisé la projection orthographique ordinaire, qui permet de faire figurer, par des constructions assez simples, les divers obstacles qui arrêtent les rayons du soleil.

Signalons également, dans le même ordre d'idées, le « Perspectographe stéréographique » de RIBLET (1952). Cet appareil très récent, permet de tracer directement sur un fond de carte représentant les trajectoires solaires aux différentes époques de l'année, le contour apparent du paysage d'une station. On détermine ainsi l'insolation possible de cette station. Comme son nom l'indique, cet appareil utilise la projection stéréographique, et pourrait servir en forêt, pour calculer les possibilités d'insolation directe en un point d'une trouée. Cependant, il ne serait plus possible de se servir directement de cette projection pour déterminer l'éclairement relatif en lumière diffuse, également très important, nous l'avons vu.

Par ailleurs, nous donnons, extrait de l'*Annuaire du Bureau des Longitudes* pour 1952, le tableau suivant, qui permettra éventuellement, d'établir les petites corrections à faire subir à notre figuration des trajectoires solaires, selon les latitudes intéressant la France :

		LATITUDES					
		41°	43°	45°	47°	49°	51°
Hauteur du Soleil : h	Solstice d'été	72°27	70°27	68°27	66°27	64°27	62°27
	Equinoxes	49°	47°	45°	43°	41°	39°
	Solstice d'hiver	25°33	23°33	21°33	19°33	17°33	15°33
Azimut du soleil à son lever et à son coucher au solstice d'été .		123°1	124°5	125°9	127°4	129°2	131°3

On peut remarquer que, si l'on appelle r le rayon du cercle d'illumination totale, on a à l'échelle, à midi, les différentes distances d, par la relation connue :

$$d = r \cos h.$$

Quant aux azimuts de lever et de coucher du soleil aux différentes latitudes, ils se comptent en vraie grandeur vers la gauche ou vers la droite à partir du sud.

A l'aide du « cercle d'illumination totale », on peut, à une époque donnée, lire directement les heures où le soleil peut apparaître dans la trouée qui y est reportée, et celles où il n'y sera sûrement pas. Par

rapport à la course totale à cette époque, on peut ainsi avoir une idée au sujet de la possibilité d'insolation relative. Bien mieux, on peut remarquer que pour une position donnée du soleil (voir fig. 15) l'éclairement produit en O est égal au produit de la projection de son image sur le plan horizontal par sa brillance (Avec un diamètre apparent de 32″, la projection du soleil, au moment du solstice d'été, est d'environ $\frac{5}{10^{5}}$ m², et sa brillance d'environ 15.10^{8} bougies par m², ce qui donne un éclairement d'environ 75 000 Lux.).

Or, l'espace Σ compris entre les deux solstices représente la totalité des positions possibles du soleil, au cours de l'année, pour une station de plein découvert figurée au centre du « cercle d'illumination totale ». La valeur de l'éclairement total provenant du soleil est de la forme : $I = f(\Sigma)$.

Si l'on considère une autre station située au centre d'une trouée circulaire (fig. 17) ou elliptique (fig 18), la surface hachurée (σ) représente la totalité des positions possibles du soleil pour éclairer le centre de la trouée. La valeur de l'éclairement total provenant du soleil est ici de la forme $i = f'(\sigma)$.

Si l'on admet, pour simplifier, que $f = f'$, la valeur de l'éclairement relatif provenant du soleil sera donc donnée par :

$$Ir = \frac{\sigma}{\Sigma}$$

Il suffira donc de planimétrer les deux surfaces ou plus simplement de les calquer sur un papier millimétré, pour avoir une idée approchée de la possibilité d'insolation relative en un point quelconque d'une trouée déterminée.

Il faut bien remarquer que, dans cette construction, on ne tient pas compte de l'affaiblissement des rayons solaires dû à l'atmosphère, affaiblissement, nous l'avons vu, d'autant plus intense que le soleil est plus bas sur l'horizon. On peut apporter la correction approximative nécessaire, en remarquant que l'on a : $m = I/\cos z$, et que, dans la formule :

$$I = I^{o} \cdot P^{m} \cdot \sin h,$$

m peut être exprimé en fonction de d, distance du centre du « cercle d'illumination totale » au centre de gravité de la surface σ ou Σ selon le cas.

Nous allons maintenant examiner quelques cas pratiques d'emploi du « cercle d'illumination totale » pour déterminer d'abord la valeur de l'éclairement relatif Er, envisageant tous les cas où la lu-

mière diffuse intervient — puis la valeur de l'éclairement relatif I r, provenant seulement du soleil. *L'éclairement relatif total dépendra, bien entendu, de l'un et de l'autre de ces facteurs.* Il n'est pas possible cependant de dire *exactement,* à l'avance, de quelle façon.

Nous rappelons que l'éclairement relatif Er, relatif à la lumière diffuse, est égal au rapport de la projection orthographique de la trouée à la surface totale du cercle. L'éclairement relatif Ir, relatif au seul soleil, est égal au rapport de la surface hachurée σ, représentant les positions possibles d'insolation pour la trouée, à la surface Σ, comprise entre les solstices, et représentant la totalité des positions du soleil pour une station de plein découvert.

A titre d'exemple, nous avons fait figurer deux trouées de surface égale. L'une, circulaire, dont le diamètre D est égal à la hauteur des arbres voisins. L'autre, elliptique, dont le grand axe orienté Nord/Sud est égal à 2 H, le petit axe étant égal à H/2. La surface est la même dans les deux cas, soit :

$$S_c = S_e = \frac{\pi \cdot H^2}{4}$$

La projection de la trouée circulaire donne, photométriquement, un éclairement relatif en lumière diffuse de 20 %.

Celle de l'ellipse de même surface donne, dans les mêmes conditions, 18 %.

En ce qui concerne le temps d'insolation possible, au centre de la trouée circulaire, il est de 2 %. Au centre de l'ellipse, il devient 8 %. Si l'on considère du reste, l'insolation relative pour la seule période active de végétation (équinoxes - solstice d'été), ces chiffres deviennent respectivement 3 et 12 %.

Si l'on tient compte de la valeur bien plus grande de la lumière provenant du soleil seul, on se rend compte du gros avantage apporté, pour une surface de coupe donnée, *par la forme* de chaque trouée.

Reprenant la trouée circulaire, recherchons la valeur de l'insolation en divers points, au sol, en bordure de cette trouée. Nous avons vu que, photométriquement, en lumière diffuse, l'éclairement relatif était partout de 14 % environ si D = H. Mais, en outre, un point situé au nord a une possibilité d'insolation de 11 % (16,5 % des équinoxes au solstice d'été), des points situés à l'est ou à l'ouest n'ont plus qu'une possibilité d'insolation de 3 % (4,5 % des équinoxes au solstice d'été). Le point situé au sud n'a plus aucune possibilité d'insolation directe, naturellement, dans nos régions.

Il est à noter qu'en ce qui concerne *un point donné,* une trouée en bande n'est pas spécialement utile, car elle se projette, même indéfinie, sous forme d'une ellipse très allongée, qui dépasse le solstice d'hiver, et n'est pas susceptible, compte tenu de sa surface, d'appor-

ter un éclairement appréciable. Bien entendu, la conclusion est différente si l'on considère l'ensemble des points de la bande.

La coupe en coin est excellente en tant que dispensatrice de lumière au point situé au sommet du coin. Elle permet de donner des possibilités d'insolation directes très larges. Il n'est du reste pas nécessaire, pour la même raison que ci-dessus, que sa projection déborde le solstice d'hiver, et même l'équinoxe. Bien entendu, elle doit être symétrique par rapport à un axe Nord/Sud, pour atteindre son plein effet. En changeant l'orientation, on peut donner l'accent, soit sur le soleil levant, soit sur le soleil couchant.

On peut d'ailleurs projeter sur le « cercle d'illumination totale » les cimes, supposées infiniment plates et opaques, d'un peuplement, et déterminer ainsi, outre l'éclairement relatif par temps couvert, la possibilité d'insolation directe, par intersection des surfaces laissées libres par les cimes avec les trajectoires solaires. Les hypothèses successives introduites rendent du reste cette manière de procéder très aléatoire.

Il est possible également de déterminer la possibilité d'insolation d'un point situé au nord d'un obstacle, d'un arbre isolé par exemple, en le projetant orthographiquement sur l'ensemble des trajectoires solaires. A noter également à cette occasion le « petit photopériodisme », auquel sont soumises par temps ensoleillé les plantes du sous-bois.

*
* *

En conclusion, il semble que les considérations théoriques que nous venons de développer, bien qu'elles fassent apparaître l'extrême complexité du problème de la répartition de la lumière en forêt, permettent cependant, dans certains cas théoriques bien déterminés (temps nuageux égal — temps ensoleillé pur) de se faire une idée approchée sur l'éclairement régnant en différents points de trouées de forme géométriques simples, et, partant, d'établir un certain nombre de tracés idéaux qui apporteraient, dans ces deux cas, une lumière relative donnée. Ceci, grâce à l'emploi d'une figure relativement simple « le cercle d'illumination totale », ou de toute autre du même genre, permettant de déterminer très rapidement, dans chaque cas, la valeur des deux éléments essentiels en cette matière : l'éclairement relatif provenant de la lumière diffuse — (ciel) — et l'éclairement relatif provenant de la lumière directe (soleil).

TROISIÈME PARTIE

RECHERCHES PERSONNELLES

I. - MÉTHODE PHOTOMÉTRIQUE INSTANTANÉE

Nous avons commencé nos observations dès l'année 1943. Une très bonne fructification de l'épicéa, à l'automne 1942, avait provoqué, un peu partout une abondante installation de semis naturels et nous avons eu l'idée de suivre ces semis pour observer ce qu'ils deviendraient, au cours des années suivantes, dans des stations de conditions très variées. Cette essence fructifiant abondamment tous les 4 ans environ, il était relativement facile d'identifier les générations successives, sans grand risque de commettre des erreurs.

Nous utilisions alors un appareil photographique avec cellule photoélectrique couplée, et transposions en éclairements relatifs les indications de cette cellule. L'état des plants est resté assez semblable les deux ou trois premières années, et ce n'est qu'à partir de l'année 1946 que l'on a pu mettre en évidence des différences déjà marquées. Nous avons alors employé un procédé un peu plus précis pour mesurer la lumière.

Voici un résumé succinct des résultats auxquels nous sommes arrivé :

Nous avons adopté comme référence dans nos travaux l'éclairement relatif, c'est-à-dire le rapport entre l'éclairement reçu sous bois et celui obtenu très peu de temps avant et après, en plein découvert (Er). Une cellule électrique L.M.T. montée en brillancemètre nous donnait la valeur de ces éclairements. On opérait, soit de préférence par temps couvert, soit par temps ensoleillé en faisant, dans ce cas, la moyenne des mesures obtenues sur un are de forêt. De toutes façons, on ne travaillait jamais par un temps nuageux variable.

La première série de mesures a eu trait à l'éclairement relatif régnant sous divers peuplements forestiers réguliers, et en particulier a été examinée la constance de cette valeur quand l'éclairement extérieur variait dans de fortes proportions (1 à 75). Il a semblé que

les chiffres relatifs obtenus, dans chaque peuplement étudié, variaient peu, surtout du reste lorsque l'on opérait par temps couvert bien égal, et dans des peuplements sombres.

Une formule a été proposée pour relier l'éclairement relatif à l'état du peuplement supérieur :

$$Er = K/N$$

Er étant défini plus haut, K étant une constante dépendant de la nature du peuplement étudié (20 environ dans le cas des sapins et épicéas), N, le nombre de tiges par hectare.

Des mesures ont été également effectuées dans des trouées.

Puis, on a tenté de voir quel était l'effet de la coupe sur la majoration de l'éclairement relatif, dans un seul cas où il a été possible d'opérer sans asseoir d'opérations spéciales. La majoration d'éclairement relatif produite par une coupe à 8 % en volume était d'environ 80 %.

On a essayé, ensuite, de noter l'influence possible de l'augmentation de la lumière sur la croissance de plants d'épicéa d'âge certain et de 4 ans en général. On a trouvé de façon assez régulière que la hauteur totale de ces plants variait à peu près comme le logarithme de l'éclairement relatif. D'autres remarques ont été faites sur l'état des jeunes sapins, ainsi que sur le tapis herbacé.

Enfin, des observations ont été effectuées sur l'importance de la densité et de la précocité du couvert, au printemps, pour la protection des jeunes semis naturels contre les gelées printanières.

Pour terminer, on a proposé de caractériser le couvert par le complément à 100 de la valeur atteinte par l'éclairement relatif moyen. Ces divers travaux ont été relatés dans le *Bulletin de la Société Forestière de Franche-Comté* de décembre 1948.

Une seconde série de mesures a eu pour but de comparer les exigences en lumière de plants de sapin et d'épicéa, âgés de 15 à 20 ans, situés côte à côte sous un peuplement assez dense où l'éclairement relatif variait de la lisière (Er : 38 %) à l'intérieur de la forêt (Er : 15 %). On notait également l'aspect des sujets de même âge situés dans une grande trouée voisine (Er : 100 %). On avait choisi une année très humide (1948), pour être assuré que le facteur limitant n'était pas ici l'eau disponible dans le sol. On a trouvé que la lumière décroissante réduisait notablement la longueur de pousse des deux essences observées, mais que, conformément à l'opinion admise par tous les sylviculteurs, le sapin supportait beaucoup mieux l'ombre que l'épicéa. Sous 15 % d'éclairement relatif, la pousse de sapin avait une longueur égale au 1/3 environ de celle obtenue pour cette essence en plein découvert — la pousse d'épicéa une longueur inférieure au 1/7 de celle obtenue par cette dernière essence en plein découvert également.

Par ailleurs, on notait que sous un éclairement relatif d'environ 5 %, les plants d'épicéa âgés de 20 à 25 ans étaient de taille réduite, donnant la preuve d'une carence certaine en un élément estimé être la lumière, étant donné qu'en plein découvert, des sujets de même âge avaient un aspect infiniment plus florissant et des longueurs de pousses de 15 à 20 fois plus importantes.

Pour conclure, on insistait sur le fait qu'il convenait de distinguer le processus d'installation des semis naturels d'épicéa (et de sapin) qui peut s'effectuer parfaitement sous un éclairement relatif très faible, et de l'ordre de 1 à 5 % — et le processus de croissance, qui exige un apport supplémentaire de lumière : 10 à 15 % au moins pour le sapin, et 25 à 30 % au moins pour l'épicéa.

Cette seconde série de recherches a été reproduite dans le *Bulletin de la Société Forestière de Franche-Comté* de juin 1949.

Une troisième série de recherches a eu pour but spécialement de prouver que le facteur sol, ou le facteur eau disponible, n'avait pas l'importance que l'on croyait dans le processus de croissance des épicéas et des sapins, et que, s'il était indéniablement très utile de les considérer, il ne fallait pas perdre de vue le rôle de la lumière ou de la radiation en général.

Dans ce but, nous avons examiné le comportement de plants identiques (éliminant ainsi le facteur individuel du sujet, et le facteur sol), au cours des années 1948 et 1949, respectivement humide et sombre — et sèche et ensoleillée. L'application de la loi du minimum, faisant intervenir, selon les cas, l'eau ou la radiation comme facteur limitant, a permis une explication correcte, nous semble-t-il, des phénomènes observés non seulement par nous-même, mais, pour éviter une orientation trop favorable de l'esprit du chercheur, par un autre observateur absolument impartial, puisqu'il ignorait le résultat qu'il fallait trouver. Sous un couvert assez sombre, les pousses de l'épicéa ont réagi favorablement à l'apport général de radiation constaté au cours de l'année 1949 (bien que la pluviosité ait été alors très réduite). A l'inverse, en plein découvert, sous une insolation en général suffisante, l'eau est devenue, par son déficit en 1949, le facteur limitant, et l'épicéa a manifesté alors une croissance moindre qu'en 1948.

Cette troisième série de recherches a été reproduite dans le *Bulletin de la Société Forestière de Franche-Comté* de juin 1950.

Mentionnons, pour mémoire, les observations préliminaires effectuées en 1946 sur des semis naturels d'épicéa de 4 ans, et qui avaient donné des résultats de même ordre.

Après l'énumération succincte de ces travaux, il nous paraît nécessaire d'apporter certaines précisions complémentaires sur les conditions dans lesquelles les mesures ont été effectuées, ainsi que sur les effets constatés.

A. - L'appareil

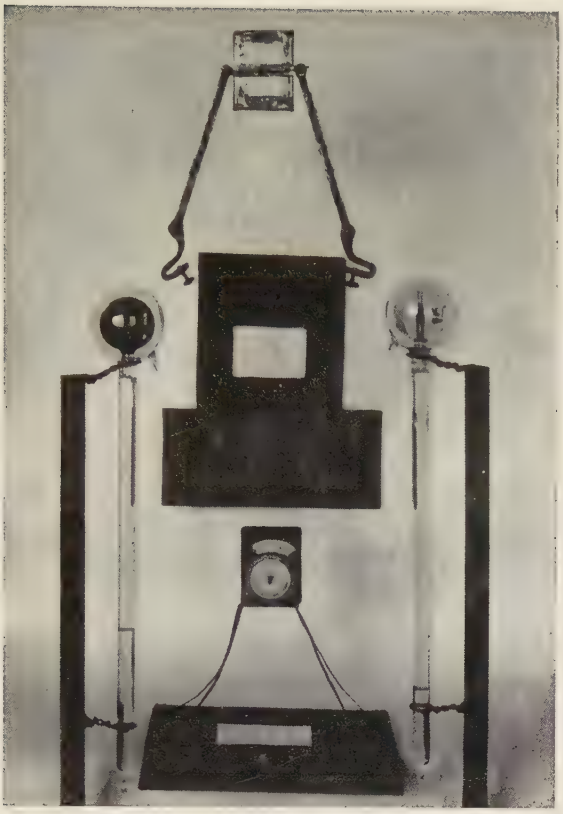
Nous avons employé diverses cellules du type photopile ; en général nous nous sommes servi de la cellule L.M.T., dont nous avons déjà donné la caractéristique satisfaisante. Le modèle à deux sensibilités avec poussoir nous a semblé le plus pratique. Mais il est gradué en temps de pose, et nous avons dû modifier la graduation selon le tableau d'équivalence fourni par le constructeur.

Ainsi qu'on peut le voir sur la photographie des appareils, la cellule est montée sur un support qui la maintient à 15 centimètres environ au-dessus d'un diffuseur qui était d'abord gris beige. Puis, sur les conseils de M. le Professeur Duffieux, nous avons noirci le diffuseur, à l'exception d'une petite carte blanche qui doit fonctionner, en théorie, comme diffuseur parfait. Eclairée par la lumière venant de toutes les directions, cette carte agit comme source secondaire, et, en éclairant la plaque sensible de la photopile, détermine le déplacement de l'aiguille sur la graduation. Il s'agit d'un montage en « brillancemètre », qui réduit l'éclairement reçu par la photopile dans la proportion de 20 à 1, environ. On l'utilise ainsi pour les mesures de lumière en forêt et en plein découvert. Un modèle de support pliant a été imaginé par M. l'Ingénieur Plaisance, et permet le transport de l'appareil dans une serviette.

Le dispositif indiqué nous semble bien plus pratique que celui qui consiste à utiliser des luxmètres industriels, gradués de façon précise de 0 à 100 Lux, ou de 0 à 500 Lux, par exemple, et qui, grâce à un système de caches et d'écrans gris, permet de réduire l'éclairement reçu de façon que l'aiguille reste toujours dans les limites de sa graduation. Il s'est révélé que l'emploi en forêt, *du moins du genre d'appareils ainsi établis que nous connaissions alors*, avec des pellicules minuscules qui se déforment au soleil, ou s'envolent au moindre souffle de vent, avec des caches variées, dont il faut noter chaque fois le détail, se révèle compliqué, et devient une source d'erreurs.

Cependant, il faut noter que dans notre montage, la précision de la graduation qui va, en 2 échelles juxtaposées, de 0 à 150, puis de 150 à 200 000 Lux, échelles qui sont elles-mêmes superposées à une graduation en temps de pose, est inférieure à celle des luxmètres signalés plus haut. Une partie de ce qui est gagné en simplification est perdu en précision.

Au cours de l'année 1952, nous avons repris des mesures avec la cellule L.A.P. à 3 sensibilités dont nous avons parlé, et qui donne des résultats voisins, avec des nuances plus marquées cependant, nuances qui sont dues à la précision nettement plus grande de l'appareil. Rien d'essentiel ne doit être modifié aux conclusions obtenues avec la cellule L.M.T. décrite plus haut. L'appareil L.A.P.



Appareils employés: à gauche, actinomètre de Bellani à boule bleue; à droite, actinomètre de Bellani à boule blanche. — Au milieu, de bas en haut: petit photomètre L.M.T. monté en brillancemètre - cache mobile - support mobile.

Luxmètre L.A.P. à 3 sensibilités. La cellule photoélectrique est munie d'un filtre réducteur au 1/20.

(Clichés Stainacre, Pontarlier).

Loi du Minimum

Une année lumineuse et sèche (1949) est encadrée de deux années plus sombres et humides. Sous 20 % d'éclairement relatif, les épicéas (à gauche) et les sapins (à droite) ont réagi différemment.

(Cliché Stainacre, Pontarlier.)

nous paraît, en tous cas, plus satisfaisant que l'appareil L.M.T., et semble devoir devenir un auxiliaire précieux du forestier.

Par ailleurs, avec le montage en brillancemètre, nous avons établi une cache en carton noir, munie d'un évidement de dimensions analogues à celle de la carte blanche. Ce dispositif permet de mesurer grossièrement le facteur global de réflexion directe et diffuse de feuilles ou de rameaux pourvus d'aiguilles, en procédant schématiquement de la manière suivante:

On opère en plein air, par temps couvert égal ou par temps pur ensoleillé; on mesure d'abord la valeur de l'éclairement reçu avec la carte blanche, puis, l'on place sur cette carte le feuillage à étudier, et l'on recouvre le tout de la cache, de façon à obtenir une surface de feuilles égale à celle de la carte blanche primitive. On lit alors la valeur de l'éclairement nouveau reçu par la photopile, puis, l'on enlève le tout, et l'on fait une nouvelle lecture de l'éclairement avec la carte blanche, à titre de vérification avec la lecture primitive. Le rapport entre la valeur de l'éclairement lu, avec feuillage et cache, à l'éclairement lu avec la seule carte blanche, donne une idée approchée du facteur global de réflexion du dit feuillage. Des erreurs sont cependant introduites du fait que les parties noires, même en carton mat, n'absorbent pas complètement la lumière.

B. - Méthode opératoire

Nous avons, en général, opéré avec un seul appareil, par temps égal, couvert, sans vent, ou absolument pur avec soleil et entre 8 heures et 17 heures. Les références à la grande trouée bien dégagée étaient prises avant et après l'opération, ce qui nous a obligé à choisir des peuplements situés à proximité de vastes espaces libres où nous nous rendions rapidement en automobile.

La constance des résultats obtenus dans ces mesures, en espace libre, nous a assuré que, du moins eu égard à la précision de notre appareil, l'éclairement absolu variait très peu pendant le 1/4 d'heure ou la 1/2 heure, qui nous était nécessaire pour effectuer les mesures sous bois.

Le problème qui s'était posé à nous était d'abord le suivant: à condition de choisir un temps couvert par nuages élevés, et sans grand vent, nous obtenions des résultats assez constants en valeur absolue ou relative, en prenant des peuplements moyennement denses (200 à 400 tiges par hectare). Nous avons publié les chiffres observés.

Par exemple, dans la parcelle 11 de la forêt communale de Pontarlier, avec 521 arbres et 729 mètres cubes par hectare, nous obtenions un éclairement relatif toujours assez voisin de 4 %.

Par temps ensoleillé, le problème était bien plus difficile. En plein

découvert, bien entendu, l'éclairement indiqué par la photopile restait constant. Mais, sous bois, le point d'observation choisi passait de l'ombre à la lumière, et inversement souvent en 5 ou 10 minutes, et l'éclairement lu sur la photopile sautait de 30-50 Lux à 300 ou 400 Lux. Quelle valeur prendre alors ?

On aurait pu, évidemment, effectuer des observations toute la journée, en prenant, toutes les 1/2 heures, par exemple, les valeurs de l'éclairement relatif, et établir une moyenne ou une courbe de

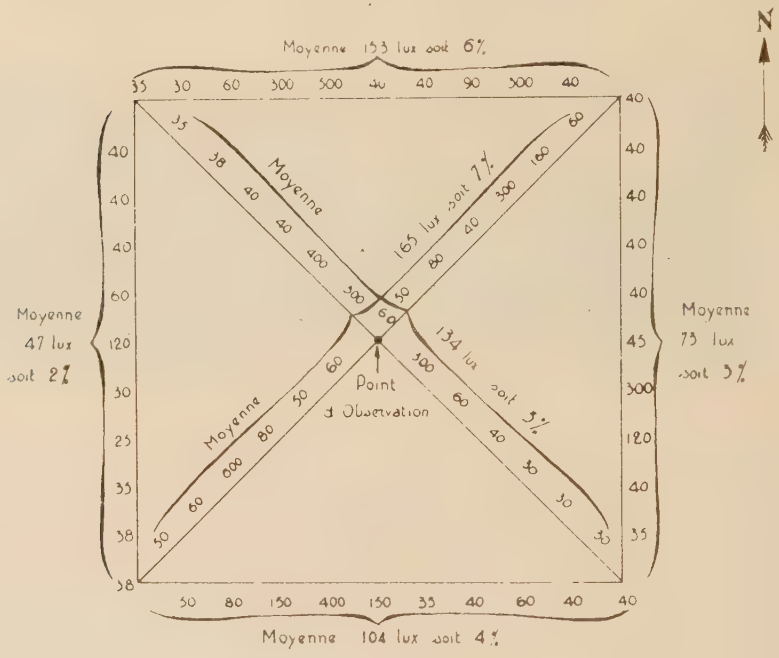


Fig. 19.

fréquence. Il fallait d'abord être assuré que le jour entier serait sans nuage, ce qui est assez rare en été dans le Haut-Doubs. On pouvait, par ailleurs, craindre une disposition du couvert qui aurait, pendant une bonne partie des époques d'observation, placé le point d'observation à l'ombre — ou au soleil.

Nous avons alors imaginé de substituer, à la succession, sur un point donné, des ombres et des lumières dans le temps, une répartition, autour du même point, des ombres et des lumières dans l'espace, au moment de l'observation. Pratiquement nous avons établi un carré de 10 m × 10 m avec diagonales, ayant le point d'observation comme centre, et avons mesuré, tous les mètres, les éclaire-

ments absolus et relatifs le long des côtés du carré et de ses diagonales.

Voici, par exemple, des résultats particulièrement intéressants obtenus le 23 mars 1950 à 14 heures, exprimés en Lux, lus sur l'appareil.

En plein découvert, la lecture donnait 2 500 Lux. Pour avoir l'éclairement réel, il faut multiplier les chiffres par 20, coefficient résultant du nouveau montage adopté en brillancemètre, avec carte blanche : ceci donne donc environ 50 000 Lux.

Les mesures ont été effectuées autour du même point où, par temps couvert, nous obtenions une valeur moyenne de 4 %.

Les chiffres lus sur l'appareil se répartissaient alors de la façon suivante (voir fig. 19) :

La moyenne générale des éclairements réels sous bois est de 2 040 Lux, soit 4,08 % du plein découvert. On voit que ce rapport se rapproche beaucoup de celui trouvé par temps couvert égal. Mais les résultats auraient été très différents si l'on avait adopté la moyenne des plages d'ombre, ou celle des plages de lumière. Du reste, pourquoi préférer l'un à l'autre de ces dispositifs ?

La figure 20 se rapporte à des mesurations répétées 3 fois au même endroit, à des moments différents. La courbe en cloche autour de chacune des moyennes (plages d'ombre - plages de lumière) se dessine nettement. La lumière se répartit donc par tout ou rien (ou presque), avec des valeurs intermédiaires réduites, ce qui est assez logique.

Bien entendu, ce procédé est infiniment plus long que celui que l'on préconise par temps couvert. Il est nécessaire de bien établir les sommets du carré sur le terrain et, dans les mesures faites tous les mètres, d'éviter soigneusement de porter une ombre sur la carte blanche, quelle que soit l'orientation de l'observateur.

Nous avons procédé également ainsi dans un peuplement feuillu en hiver. Les branches qui portent des ombres sont de dimensions très réduites, et les observations tous les mètres ne sont plus assez rapprochées. On obtient, comme valeur moyenne, de l'éclairement par temps ensoleillé pur, des chiffres qui sont situés de part et d'autre de la valeur moyenne obtenue par temps couvert égal.

Il est évident, enfin, que si l'on a affaire à un temps demi couvert, avec nuages mobiles et soleil intermittent, il est inutile de faire des observations. On risque d'introduire de telles chances d'erreurs que l'on effectuerait un travail sans aucune valeur.

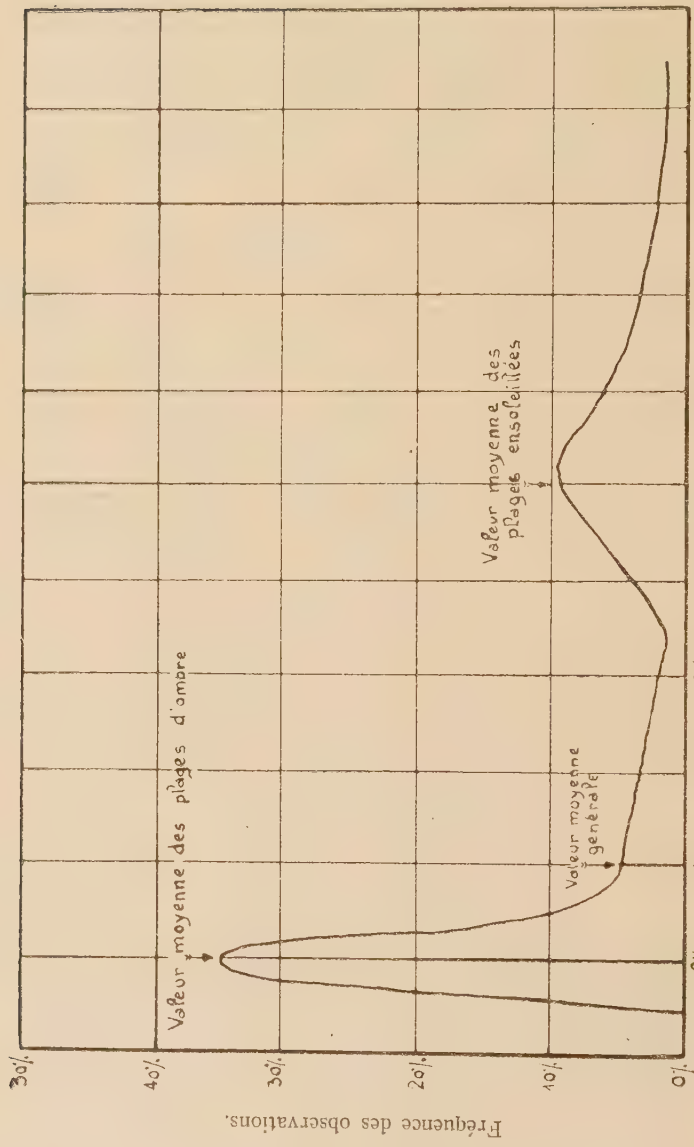


FIG. 20.
Courbe de fréquence des valeurs d'éclairement relatif sous un peuplement résineux pur par temps ensoleillé

C. - Répartition de l'éclairement dans les peuplements

Nous avons mentionné également dans nos études la relation empirique: Er: K/N, qui nous semble résulter de nos mesures instantanées répétées par temps couvert dans le Haut-Doubs.

Er est l'éclairement relatif instantané.

N, le nombre de tiges à l'hectare.

K, un coefficient qui doit varier avec chaque essence, mais qui, pour les épicéas et sapins semble voisin de 20.

Cette relation n'est valable qu'à partir de N: 150 ou 200 tiges à l'hectare.

Si N = O, la formule ci-dessus donnerait:

Er = ∞ , ce qui est faux, puisque dans ce cas (plein découvert) Er = I.

Par contre, si N croît jusqu'à une valeur élevée (4 000 tiges et davantage), la formule s'applique toujours, et Er tend vers O sans jamais l'atteindre, quelle que soit la densité *pratique* des peuplements.

La hauteur des arbres n'intervient pas, semble-t-il, et nous rejoignons là la conclusion théorique au sujet de l'éclairement relatif dans les peuplements. Mais les valeurs résultant de nos mensurations ne concordent pas avec celles résultant de l'application théorique de la loi de GAZIN. Il n'y a là rien de surprenant, ainsi que nous l'avons fait remarquer.

Dans les trouées, nous obtenons des valeurs d'observation, en général un peu inférieures à celles résultant de la formule théorique, qui, elle, comporte beaucoup moins d'imprécision. Ceci tient à ce qu'il est difficile d'évaluer le diamètre exact d'une trouée avec des arbres de 20 à 25 mètres de hauteur. Nous avons adopté la mesure entre les pieds des arbres de lisière. De cette façon, et bien que les résineux de forme conique se prêtent bien à l'acheminement des rayons lumineux, en ligne droite, du bord supérieur de la trouée, au niveau des cimes des arbres, jusqu'au point d'observation situé au sol, au centre de la trouée, il y a indéniablement des branches indisciplinées ou des houppiers trop développés qui réduisent les chiffres théoriques.

Par ailleurs, les trouées sont rarement absolument circulaires, et leurs bords aussi, rarement absolument réguliers.

Du reste, là encore, il y a ainsi que nous le verrons plus loin, une assez bonne concordance entre la formule théorique et les résultats de certaines observations actinométriques continues pendant une longue période d'observation.

D. - Effets sur la végétation - Loi du minimum

Pour déterminer les effets sur la végétation, il faut évidemment prendre *le critère caractéristique* de la croissance des plants envisagés. Nous nous sommes occupé à peu près exclusivement du sapin et de l'épicéa, qui atteignent dans le Haut-Doubs la plus grande valeur économique. Tout à fait occasionnellement, nous avons noté, à propos des mesures actinométriques du reste, l'état des plantes du sous-bois. Or, pour le sapin et l'épicéa, divers critères peuvent être envisagés :

— l'aspect général — la longueur de la pousse annuelle — son diamètre — le volume de cette pousse — son poids frais — son poids sec, etc...

Nous avons adopté, en général, dans nos mesures photométriques, les deux premiers caractères. Pour les mesures actinométriques, nous avons joint les mesures de diamètre et les calculs de volume. Nous n'avons pas fait de mesures de poids. Par contre, pour les plants d'un an, nous avons jugé utile d'envisager des coupes microscopiques. Bien entendu, dans un éclairement déterminé, les pousses n'ont pas toutes la même dimension, et *il faut faire des moyennes pour chaque station*. Les résultats de ces mesures sont donnés à la figure 24, et l'on peut y voir que l'épicéa, spécialement observé, réagit de façon très favorable à l'augmentation de la lumière ou de la radiation. On peut se reporter également aux photographies annexées à cette étude.

A ce propos, il est un problème important qu'il n'est pas dans notre dessein, faute de connaissances suffisantes, de traiter en détail, mais que nous allons sommairement exposer :

Tous les auteurs forestiers, des plus anciens aux plus modernes, distinguent classiquement les essences dites « de lumière » — chêne et pin par exemple, qui exigent, pour se développer, un éclairement assez intense, et les essences « d'ombre », sapin et hêtre notamment, qui supportent un certain couvert. Cette opinion, qui résulte d'observations très nombreuses répétées pendant plusieurs dizaines d'années, et qui est l'un des « credo » du forestier, semble entrer en contradiction avec les progrès récents des études concernant les substances de croissance, l'auxine en particulier. Cette hormone, en effet, est détruite ou inactivée par la lumière, et l'on peut se demander s'il n'y a pas opposition entre cette action, et la constatation pratique que les essences « de lumière » réagissent favorablement à la majoration de leur climat lumineux.

Dans la copieuse revue des principaux travaux concernant les substances de croissance qu'il a effectuée en 1949, P. CHOUARD apporte de sérieuses réserves à une interprétation trop systématique de l'idée que la lumière détruit l'auxine, ou l'inactive, ou enfin rend

les tissus végétaux insensibles à l'auxine. Il indique notamment que la lumière est nécessaire à la synthèse, dans les feuilles, de la substance-mère de l'auxine — que l'auxine est détruite *in vivo*, mais *surtout in vitro*, par la lumière violette et ultra-violette ; il attribue à une insuffisance de la photosynthèse, le défaut de production des auxines, qui fait que les plantes s'allongent peu en jours courts, dans les phénomènes de photopériodisme. Ce fait a déjà été signalé par GARNER et ALLARD.

En somme, nous nous trouvons devant un phénomène complexe, où interviennent principalement *la production* de la substance-mère de l'auxine dans les feuilles, ceci d'autant plus activement que la photosynthèse est plus intense — et, après élaboration de l'auxine dans les bourgeons terminaux et diffusion basipète, *la destruction* plus ou moins rapide de celle-ci par la lumière qui pénètre à l'intérieur des tissus.

Il s'établit un état d'équilibre entre ces deux actions contraires — état qui doit être variable suivant les espèces, pour diverses raisons, ne serait-ce qu'à cause de la perméabilité plus ou moins grande des tissus végétaux à la lumière — et qui donne une mesure des exigences pratiques de croissance.

Ajoutons, à l'appui de cette hypothèse d'une protection naturelle de l'auxine contre sa destruction par la lumière, le fait, bien connu, que diverses essences forestières, le sapin et l'épicéa en particulier, ne manifestent, par éclairement latéral, aucune tendance au phototropisme. Une simple considération d'équilibre entre la formation et la destruction de l'auxine expliquerait mal l'absence de réaction à une lumière latérale. On constate aussi parfaitement sur les souches des arbres situés en bordure des trouées, que le côté exposé à la lumière a crû davantage que le côté situé vers le massif plein.

En résumé, sans avoir la prétention de mettre en doute les résultats acquis en matière de substance de croissance, nous pensons que ceux-ci doivent faire l'objet d'une interprétation nuancée en ce qui concerne un grand nombre d'essences forestières.

Une difficulté importante dans les observations consiste dans l'intervention de la « loi du minimum », déjà bien mise en évidence par BLACKMANN, dans le cas de la fonction chlorophyllienne, avec les facteurs : lumière, température et gaz carbonique. On rappelle que, dans ce cas, c'est le facteur minimum qui impose sa loi. Or, la même règle semble se rencontrer en matière de physiologie végétale, et de croissance des plants forestiers en particulier. Si la lumière, la température, l'eau, la qualité du sol notamment, ne sont pas dans des proportions équilibrées, il y a « freinage » par le facteur relativement déficient.

Nous avons expliqué en détail, dans notre esquisse d'une « petite histoire de la photologie forestière » (1951), comment nous pen-

sions que c'est de cette façon qu'il convenait, à notre sens, d'envisager les diverses expériences, celles de TOUMEY en particulier, qui avaient mis en évidence, dans des conditions exactes mal connues du reste, l'influence favorable de l'isolement des jeunes plants de pins situés sous le couvert, par suppression des racines des grands arbres concurrents.

KRAMER (1949), cite, dans le même ordre d'idées, les expériences de LOUSTALOT (1945), faites dans du sable fin, où les plantes observées manifestaient, avec 5 à 6% d'humidité seulement, une photosynthèse encore normale. Lorsque le taux d'humidité descendait à *1 % environ*, le taux de photosynthèse passait de 100 % à 30 % environ. LOUSTALOT s'était placé évidemment dans des conditions telles que l'alimentation en eau était devenue le facteur limitant. Notons que dans les sols argilo-calcaires du Haut-Doubs, le taux d'humidité du sol est normalement de l'ordre de 15 à 20 %.

Comme nous l'avons indiqué, *tout n'est qu'une question de proportion*, et KRAMER termine sa savante étude sur l'influence de l'humidité du sol sur la croissance des plantes, par un chapitre où il relate les effets heureux d'un déficit en eau disponible.

Nous avons cité, dans un de nos travaux (1950) des mesures effectuées par des observateurs divers, et qui semblaient nettement confirmer ce fait, pour l'été excessivement lumineux et sec de 1949. Nous reproduisons par ailleurs une photographie typique des pousses d'épicéa et de sapin en 1948, 1949, 1950. (Voir p. 55.)

L'année 1949, très ensoleillée et peu pluvieuse, a été encadrée par deux années nettement plus humides et sombres. En plein découvert (lumière 100 %), c'est surtout le facteur humidité qui a joué, et comme il a varié dans de très fortes proportions (— 50 % en 1949), alors que la lumière n'avait été majorée que de 27 %, la pousse 1949 a été, en général, défavorisée.

Par contre, sous un couvert assez dense, la lumière est en général fortement réduite (à environ 20 % du plein découvert). Les précipitations le sont beaucoup moins (il reste environ 60 % du plein découvert). Une légère majoration du facteur lumière, *nettement déficient dans ce cas*, entraîne donc une réaction favorable beaucoup plus nette, qu'une majoration du facteur précipitation, inutile ici parce qu'en large *excédent relatif* dans tous les cas. Ce mode d'observation élimine le facteur sol, et le facteur qualité individuelle du plant observé, puisque l'on opère sur les mêmes tiges, en observant seulement les effets des facteurs principaux météorologiques ; lumière (et chaleur évidemment) et eau. *Cependant, cette action est loin d'avoir été partout aussi nette*, et ne s'est bien produite que dans des sols assez profonds et contenant suffisamment d'eau.

On peut, à cette occasion, voir confirmé le caractère très mar-

qué d'essence de lumière de l'épicéa (par opposition au sapin), par la réaction qu'il manifeste à la majoration de radiations en 1949.

Nous verrons la confirmation de ce fait lors de l'exposé des mesures actinométriques, et de la réaction des plants de sapin et d'épicéa de 1 an, à des conditions très différentes de rayonnement.

E. - Etat électrique de l'atmosphère

On est rarement assuré de l'isolement du facteur dont on veut mesurer l'effet. En particulier, nous nous sommes posé la question de savoir dans quelle mesure l'état électrique de l'atmosphère pourrait intervenir pour fausser les résultats de nos observations. On sait que les expériences déjà anciennes de l'Abbé NOLLET, de JALLABERT, de JAMBRAY, et de l'Abbé BERTHOLON avaient, au milieu du XVIII[e] siècle montré l'influence de l'électricité atmosphérique sur la croissance des végétaux. GRANDEAU, Doyen de la Faculté des Sciences de Nancy, et Directeur de la Station Agronomique de l'Est, a repris, en 1877, et 1878, dans des conditions expérimentales très précises, la question et a conclu :

— d'une part, que le potentiel électrique était nul ou très faible en forêt ou sous les grands arbres isolés (électromètre de THOMSON),

— d'autre part, que les plantes diverses (maïs - tabac - blé) soustraites à l'électricité atmosphérique par leur installation dans des cages de FARADAY à larges mailles, manifestaient une croissance réduite de 30 à 50 % par rapport à celles placées entièrement à l'air libre.

Par ailleurs, M. IABLOKOFF, Docteur ès Sciences et entomologiste distingué, a observé souvent que, sous les futaies, le potentiel électrique était voisin de celui du sol.

MARINESCO, en 1932, a étudié l'influence des facteurs électriques sur la végétation, et a attribué à l'action de « l'osmose électrique » et de la différence de potentiel dite « de filtration » ou « électrocinétique » certaines variations de la croissance des végétaux. En reliant le sommet d'une plante au pôle + d'une batterie électrique (ou en créant un champ électrique + autour de sa cime), et en reliant sa racine au pôle —, il détermine expérimentalement une majoration de la vitesse du flux ascendant de sève. Il ralentit cette vitesse et l'annule en changeant la direction du courant.

VLES, en 1940, relate une série s'expériences faites pour mettre en évidence l'action du champ électrique de l'atmosphère sur l'homme, les animaux ou les végétaux. En ce qui concerne ces derniers, il compare la croissance de diverses plantes, graminées surtout, croissant dans des pots isolés électriquement du sol, ou reliés électriquement avec lui. Il cite également des expériences de TIRELLI

dirigées dans le même sens. Un effet semble constaté, mais on observe, par l'isolement électrique, tantôt une augmentation de la croissance, tantôt une diminution. On ne peut actuellement déduire de ces travaux une action nettement orientée. Il nous semble, par ailleurs, que les recherches de VLES prêtent à certaines critiques. En effet, d'après les photographies jointes à son travail, les expériences ont été faites en laboratoire, c'est-à-dire à l'intérieur d'un système qui devait se trouver à un potentiel très voisin de celui du sol ; il se peut que des résultats plus nets seraient obtenus avec des plantes exposées en plein air.

Il est à noter que récemment BREAZEALE (E. L. et J. F.) et MAC GEORGE (1951) ont repris ces idées sous une forme théorique, en considérant la nutrition de la plante comme un phénomène en partie électrique, les explications actuelles faisant intervenir la diffusion pour l'absorption des liquides, se révélant, d'après ces auteurs, insuffisantes.

Devant cette série de faits, on pouvait donc se poser sérieusement la question suivante :

L'état nettement déficient des régénérations d'épicéa âgées souvent de 20 à 50 ans, situées sous les couverts des grands arbres qui les dominent, n'était-il pas dû à cette annulation du potentiel électrique, constatée par de nombreux observateurs. Que devenait alors le facteur Lumière ?

Il faut remarquer, d'abord, que les expériences de GRANDEAU n'ont relevé que des diminutions de croissance de l'ordre de 30 à 50 %, alors que nous avons enregistré, pour l'épicéa, des déficits de l'ordre de 95 %. Cependant, pour fixer ce point, nous avons recommencé en 1950-1951 les expériences de GRANDEAU, dans une pépinière de la forêt domaniale de la Grand-Côte en bordure du lac de Saint-Point, et située à une exposition très ensoleillée. Une cage de Faraday en fils d'acier rigides de 0,40 m de côté, avec quadrillage en fils plus fins et pourvu de 4 pointes supérieures a été construite et installée :

a) *En 1950*, pendant toute une période de végétation, au milieu d'une planche d'épicéas de 4 ans repiqués, et de vigueur satisfaisante, A la fin de la saison de végétation, les plants ont été examinés, et les pousses mesurées. Voici les résultats :

Vigueur moyenne très semblable dans la cage et au dehors.

Longueur moyenne de la pousse annuelle des 18 plants sous la cage : 0,100 m.

Longueur moyenne de la pousse annuelle de 50 plants pris autour de la cage : 0,087 m.

b) *En 1951*, pendant toute la période de végétation, au milieu d'une planche d'épicéas de 3 ans non repiqués et de vigueur satisfaisante. En fin de saison de végétation, les plants ont été exami-

nés, et aucune différence n'a été constatée entre ceux situés à l'intérieur, et ceux situés à l'extérieur de la cage.

Le résultat de ces observations est donc absolument négatif.

Il est à remarquer pourtant que le dispositif adopté, bien qu'employé avec succès par GRANDEAU, présente certains inconvénients. Il ne protège pas les plants contre les ions, en général négatifs, qui peuvent monter du sol lorsqu'il s'échauffe, peut-être même contre les ions mobiles par temps très instable. Surtout, il ne met pas les plants à l'abri des charges électriques portées par les gouttes de pluie, les grêlons et les flocons de neige. SIMPSON (1932) a trouvé que les pluies, régulières ou orageuses, étaient chargées en général positivement, la neige négativement. Ces charges peuvent être inversées en cas de temps très instable. Or, la cage de FARADAY ne met pas les plants qui s'y trouvent à l'abri des précipitations, donc de leurs charges électriques, et il y a là une incertitude très importante, qui enlève beaucoup de leur valeur aux résultats obtenus.

F. - Emploi du Brillancemètre pour déterminer le pouvoir global de réflexion directe et diffuse

On peut employer le dispositif indiqué (avec cache) pour essayer de déterminer le pouvoir réflecteur global des feuillages des diverses essences forestières. Nous rappelons que l'on peut opérer de la façon suivante :

1° mesure de la lumière réfléchie par la carte blanche,

2° mesure de la lumière réfléchie par le feuillage à étudier,

3° mesure de la lumière réfléchie par la carte blanche.

Ceci, par temps couvert ou par temps clair, sans nuages.

Voici quelques chiffres obtenus, et qui n'ont qu'une simple valeur indicative. Des résultats beaucoup plus intéressants seraient obtenus avec un spectrophotomètre qui permettrait d'analyser l'importance des diverses radiations réfléchies :

Feuillage étudié	Facteur de réflexion global
Sapin et Epicéa ..... (partie supérieure des aiguilles)	10 à 15 %
Sapin ..... (face inférieure des aiguilles)	15 à 18 %
Hêtre ..... (pleine saison de végétation)	20 à 24 %
Hêtre ..... (premier feuillage)	24 à 28 %

Il s'agit, nous l'avons dit, d'un simple ordre de grandeur ; cette mesure, bien que d'apparence simple, est assez délicate, et les chiffres obtenus varient souvent.

On peut, en tous cas, remarquer, d'une façon générale, que le feuillage sombre des résineux absorbe une proportion nettement plus importante des radiations que celui des feuillus, ce qui explique, en partie, le rendement plus élevé des premiers dans des conditions égales, et, sans verser dans un finalisme excessif, mettre en relief l'avantage apporté par la couleur très claire des feuilles tendres et fragiles du hêtre au premier printemps. En effet, ce facteur diminue leur rayonnement nocturne (pour une température donnée, un corps rayonne d'autant plus qu'il absorbe plus de lumière, donc qu'il est plus sombre), et par conséquent leur chance de gel.

II. - MÉTHODE ACTINOMÉTRIQUE CONTINUE

La photopile ne donne, nous l'avons dit, des indications que pour la partie visible de la radiation. Les actinomètres ont une sensibilité plus étendue, et renseignent sur la totalité de l'énergie incidente, convertie, dans l'appareil de BELLANI, en énergie calorifique.

Par ailleurs, leur construction, qui les rend totalisateurs, permet d'élargir le champ des recherches et d'obtenir, pendant une longue période de temps, des renseignements sur la quantité de calories reçues pour une station donnée, en plein découvert, ou sous un peuplement donné.

Il nous a paru intéressant d'observer le fonctionnement de ces appareils, qui nous ont été aimablement prêtés par la Station de Recherches de Nancy, pendant des périodes allant du 1er mai au 30 septembre 1951 et 1952. Leur installation fut effectuée en 1951 dans les conditions suivantes :

a) *En plein découvert*, dans le Haut-Doubs, en diverses stations du rebord et de l'intérieur des Hautes Chaînes du Jura, ceci, autant que possible en comparaison avec une station de référence à Besançon, dans la basse vallée du Doubs.

A cet effet, nous avons placé les appareils suivants : (B : appareil *blanc ;* b : appareil *bleu*).

(Le numéro est celui de l'appareil employé).

	Observateur:
Besançon St Ferjeux (B-388) (Alt. environ 300 m).	M. Bejean, Ingénieur des Eaux et Forêts.
Pontarlier - Stat. E.D.F. (B-325) (Alt. 830 m).	M. Monnin, Chef de Station E.D.F.
Granges-Ste-Marie (B 351) (Alt. 851 m).	M. Lanquetin, Chef de District des Eaux et Forêts.
Les Fourgs (B-449) (Alt. 1 090 m).	M. Loye, Agent Technique des Eaux et Forêts.

b) *sous divers peuplements de la forêt domaniale de la Grand' Côte* (massif d'altitude moyenne de 1 000 mètres; surface: 382,92 ha: matériel à l'hectare au dernier comptage: 472 m³).

Essences: Sapin: 53 %; Epicéa: 45 %; Hêtre: 2 %.

Exposition Nord-Ouest; Pente: 5 % environ; Sol argilo-calcaire; Type: rendzine forestière.

Les appareils furent placés dans la partie inférieure de la forêt, à une altitude variant de 880 à 920 mètres environ, et à une distance de 1 km à 1.500 km de la Station de référence en plein découvert des Granges-Ste-Marie.

Nous avons assuré concurremment avec le Chef de District Lanquetin le relevé hebdomadaire des appareils; des comptages ont été effectués autour des actinomètres installés dans les peuplements réguliers, sur une surface de 4 ares, en comprenant toutes les tiges de 0,40 m de circonférence et au-dessus, encore vertes, c'est-à-dire pouvant jouer un rôle dans la réduction de la radiation. Ces comptages réduits ont permis de déterminer le nombre d'arbres et le matériel moyen à l'hectare « efficaces » autour des appareils.

Voici les caractéristiques des stations:

Parcelle 12. (b-382) — Dans un peuplement régulier. - Comptage réduit: 1 650 tiges et 500 m³ par hectare. Hauteur totale des arbres: 12 à 16 mètres. - Sapin: 95 %.

Parcelle 17. (b-434) — Dans un peuplement régulier. - Comptage réduit: 650 tiges et 462 m³ par hectare. Hauteur totale des arbres: de 20 à 25 mètres. - Sapin: 95 %.

Parcelle 13. (b-461) — Dans un petit bouquet régulier au milieu d'une parcelle irrégulière. - Comptage réduit: 625 tiges et 487 m³ par hectare. Hauteur totale des arbres: de 20 à 25 mètres. - Sapin 95 %.

Parcelle 13. (b-469) — A 12 mètres à l'est de la précédente, en bordure d'une trouée de 10 à 12 mètres de rayon, un peu à l'abri d'épicéas naturels de 3 à 6 mètres de hauteur.

Parcelle 13. — (B-344) A 12 mètres à l'est de la précédente ; vers le milieu d'une trouée de 10 à 12 mètres de rayon. Hauteur des grands arbres voisins : 20 à 25 mètres. A proximité de l'appareil, au Nord-Ouest, bouquet d'épicéas naturels de 3 à 6 mètres de hauteur. La trouée est très ancienne et nous n'avons pas relevé de souches indiquant une exploitation même peu récente. Ses bords sont cependant irréguliers avec plusieurs vides.

A. - Appareils employés

Les appareils que nous avons employés sont des actinomètres de Bellani à distillation. Ils comprennent une double sphère en verre, avec un vide intermédiaire. La sphère intérieure, remplie d'alcool ou d'un autre liquide volatil, est traversée presque jusqu'à sa partie supérieure par un tube fin ouvert vers le haut, et qui se prolonge à l'extérieur, vers le bas, en supportant une graduation (0 à 32 cm^3).

La majorité des radiations solaires (sauf une partie de l'ultraviolet) traverse le verre extérieur et le vide intermédiaire, et est absorbée en plus ou moins grande partie par le verre intérieur et son contenu de liquide volatil. Il est à noter que le verre intérieur est, soit incolore, soit bleu foncé, ce qui assure dans ce cas, à l'appareil, une absorption des radiations environ deux fois plus grande. La sphère intérieure et son contenu s'échauffent et tendent à perdre leur chaleur, non par conduction ou convection à cause du vide qui les entoure, mais par rayonnement de grande longueur d'onde. En effet, la loi de Wien indique que $\lambda . T = 2885$, λ étant la longueur d'onde correspondant au maximum de la courbe de rayonnement, et T la température absolue du corps qui rayonne.

Si $T = 323°$, pour une température du récipient d'environ 50° par exemple, on a : $\lambda = 9\ \mu$.

Or, ces radiations de grande longueur d'onde ne traversent plus le verre de la sphère extérieure, mais sont absorbées par lui et l'échauffent. Cette sphère rayonne alors, moitié vers l'intérieur, moitié vers l'extérieur. Il y a donc une concentration de chaleur sur la sphère intérieure et sur son contenu qui s'évapore et distille. La partie inférieure du tube est nettement plus froide : en effet, de verre transparent, et bien moins épaisse que la sphère supérieure, elle absorbe moins de radiations, et surtout, s'étant échauffée, perd *par conduction et convection* (car elle est en contact avec l'air ambiant) et par rayonnement, la chaleur du liquide qui distille. On a donc un point froid où s'accumule, dans le tube gradué, le liquide distillé de la sphère supérieure.

Ces appareils sont totalisateurs, c'est-à-dire qu'ils accumulent les indications pendant un temps donné.

Pratiquement, nous n'avons pas observé, par temps très ensoleillé, une distillation journalière supérieure à 25 cm^3 dans l'appareil blanc (le tube gradué contient 32 cm^3). L'appareil bleu aurait distillé pendant la même journée environ 50 à 55 cm^3, et il aurait fallu le remettre à 0 à midi. C'est la raison pour laquelle nous avons employé en plein air, avec levé chaque jour, les appareils blancs, et en forêt, avec levé deux fois par semaine ou tous les 8 jours, les appareils bleus.

Il est à noter, enfin, que chaque appareil à ses caractéristiques spéciales, et que l'emploi en est subordonné à un étalonnage par comparaison avec l'appareil type de Montsouris (1 cm^3 de cet actinomètre correspond *en théorie* à 23 petites calories par centimètre carré).

Que valent pratiquement ces appareils ?

Le cours de Météorologie de l'Ecole d'Application de l'O.N.M. les présente comme satisfaisants. De nombreux expérimentateurs: Raymond, Besson, Marcel, Chouard récemment les ont utilisés. Cependant, leur emploi est assez discuté.

Henry (Météorologie, Nov. 1926) a fait une étude complète de l'appareil, et donne des conclusions très nettes. L'actinomètre de Bellani est au moins égal, sinon supérieur aux actinomètres enregistreurs de Kimball et de Gorczynski, auxquels il a été comparé. Il donne même des résultats beaucoup plus proches *de la moyenne* des observations de ces deux derniers appareils, que chacun de ceux-ci pris isolément. Par ailleurs, deux actinomètres de Bellani employés pendant 26 mois ont révélé une marche absolument analogue (ils étaient bien privés d'air) et l'un d'eux ayant été fêlé en fin d'observation, a accusé des écarts plus sensibles, mais nullement exagérés. D'autre part, Henry donne l'origine de l'équivalent calorimétrique du cm^3 d'alcool distillé = 23 calories par cm^2, cité dans tous les travaux ayant trait aux actinomètres de Bellani. Il s'agit de la moyenne des résultats des expériences faites pendant 33 mois à Antibes et à La Havane, pour déterminer la quantité de chaleur reçue par cm^2 de *surface normale* au rayonnement solaire. Cette équivalence est donc nettement trop élevée, si l'on considère un cm^2 de surface horizontale, et c'est ce qui explique que les données des appareils de Bellani, multipliées systématiquement par le coefficient 23, donnent des chiffres en général trop forts.

Geslin et Godard (Météorologie, Juillet 1940) ont repris l'étude pratique des acinomètres de Bellani. Ils estiment que pour pouvoir être exprimées en calories, les données de l'actinomètre type de Montsouris (Boule bleue n° 46) doivent être affectées d'un coefficient différent selon le mois de l'observation. Ils font observer logiquement que l'appareil de Bellani est une sphère qui reçoit également les radiations de toutes les directions, quelle que soit la hauteur du soleil sur l'horizon, mais qu'il n'en est pas de même de

la surface horizontale de 1 cm² choisie comme référence pour mesure de la radiation globale. Besson (1934) arrivait aux mêmes conclusions.

Voici les chiffres proposés par Geslin et Godard:

Equivalent calorimétrique moyen d'un cm³ d'alcool distillé par l'actinomètre type, pour chaque mois de l'année:

Janvier	15,9	Juillet	17,7
Février	16,65	Août	16,83
Mars	16,8	Septembre	16
Avril	17,9	Octobre	15,35
Mai	18,6	Novembre	15,9
Juin	18,05	Décembre	14

Moyennant l'emploi de ces coefficients, et à condition de considérer des périodes assez longues (1 décade ou 1 mois), l'actinomètre de Bellani donnerait des résultats aussi satisfaisants que le solarigraphe de Gorczynski.

Cependant, lors de l'exposé synthétique remarquable qu'il a fait en 1947 à la Conférence de Pédologie méditerranéenne, sur la « Caractérisation des Climats locaux », Geslin formule à nouveau de sérieuses réserves à l'égard des actinomètres à distillation. Nous pensons qu'il s'agit surtout de la question délicate du coefficient d'équivalence:

centimètre cube d'alcool distillé/calories par centimètre carré.

Car, quand il s'agit de mesures comparatives, la plupart des observateurs s'accordent à reconnaître aux actinomètres de Bellani une marche assez parallèle. Des observations, à l'automne 1951 et au printemps 1952, de groupes d'appareils (12 au maximum) dans les mêmes stations, nous ont donné les indications suivantes:

1° Marche apparente (même sans rectification d'étalonnage) assez voisine par groupe d'instrument (boule blanche et boule bleue).

2° Sensibilité relative plus faible des appareils blancs aux éclairements peu intenses (jours sombres à 5 000 ou 8 000 Lux).

3° Sensibilité décroissante des appareils blancs par rapport aux bleus quand la sphère intérieure se vide.

Si l'on tient compte, cependant, du fait que les appareils sont étalonnés par rapport à un actinomètre de référence unique, on voit que ces inconvénients peuvent être en partie corrigés, et que les actinomètres de Bellani sont susceptibles de rendre des services certains dans le domaine qui nous intéresse.

B. - Résultats des observations en plein découvert

Nous allons d'abord indiquer, pour chacune des stations, les résultats obtenus, exprimés en cm^3 de l'actinomètre type de MONTSOURIS, selon graphiques d'étalonnage des appareils effectués avant et après les mesures. Le temps d'observation a été divisé en XXII périodes correspondant chacune à une semaine (Samedi soir au Samedi soir), à l'exception de la période I (1er au 5 mai) et de la période XXII (23 au 30 septembre) :

	Périodes	Besançon	Pontarlier	Granges Ste-Marie	Les Fourgs
I	1 au 5 mai	140,6	129,5	123,3	125,7
II	6 au 12 mai	124,4	93,4	112,9	107,1
III	13 au 19 mai	105,8	120,8	120,1	124,7
IV	20 au 26 mai	194,3	190,4	194,6	213,7
V	27 mai au 2 juin ...	107,8	162,6	143,7	152,7
VI	3 au 9 juin	186,2	228,9	207,5	202
VII	10 au 16 juin	225,8	310,2	292,7	297
VIII	17 au 23 juin	107,2	172,2	155,6	156
IX	24 au 30 juin	106,2	146,9	136,3	123,8
X	1 au 7 juillet	213,5	349,5	315,7	360,2
		1 511,8	1 904,4	1 802,4	1 862,9
XI	8 au 14 juillet		205,1	214,7	193,4
XII	15 au 21 juillet		230,8	221,3	244
XIII	22 au 28 juillet		220,7	185,6	174,1
XIV	29 juillet au 4 août.		199,3	190,2	216,8
XV	5 au 11 août	Observations	118,2	134,6	122,9
XVI	12 au 18 août	arrêtées	203,9	205,5	212,6
XVII	19 au 25 août		144,8	138,3	148,8
XVIII	26 août au 1 sept. ..		215,4	218,7	215
XIX	2 au 8 septembre.		192,7	169,9	177,5
XX	9 au 15 septembre.		163,2	161,7	195,3
XXI	16 au 22 septembre.		140,8	168,2	158,3
XXII	23 au 30 septembre.		83,2	100,3	89,9
	Total		4 022,5	3 911,4	3 961,5
	Proportion		100 %	97,25 %	98,25 %

Remarquons que la semaine la plus ensoleillée N° X (1er au 7 juillet) donne :

Les Fourgs	360,2
Pontarlier	349,5
Granges-Ste-Marie	315,7
Besançon	213,5

La plus sombre n° XXII (23 au 30 septembre) :

Granges-Ste-Marie	100,3
Les Fourgs	89,9
Pontarlier	83,2

Le nombre des jours où la distillation dépasse 50 cm^3 est de 3 aux Granges-Ste-Marie, de 17 à Pontarlier, et de 18 aux Fourgs. Ces jours sont situés uniquement dans les mois de juin et de juillet. Le nombre de jours où elle est inférieure à 5 cm^3 est de 8 aux Granges-Ste-Marie, de 12 à Pontarlier, et de 13 aux Fourgs.

On peut remarquer l'énorme différence pour le total des périodes I à X, entre la quantité de radiations reçues à Besançon, et celle qui caractérise les trois stations de montagne. L'observateur de Besançon a bien signalé que, pendant une demi-heure environ avant le coucher du soleil, les rayons de cet astre n'atteignaient plus l'appareil, cette influence ne peut cependant qu'être assez minime sur la marche générale de l'instrument, et il est très regrettable que, par suite des circonstances, nous n'ayons pas pu poursuivre les observations pendant toute la période en cause.

Cette discordance, nettement plus élevée que celle qu'on l'on aurait pu attendre, peut s'expliquer peut-être, en partie, par des différences dans la périodicité des lectures.

Signalons que les observations ont repris, depuis le 1er mai 1952, et seront poursuivies, sans doute, en 1953, grâce à une chaîne de 5 actinomètres échelonnés de Besançon (311 m), au Chalet du Petit Morond sur le Mont d'Or à 1 314 m d'altitude.

Afin de rendre les résultats des observations 1951 plus clairs et pour essayer de les exprimer en calories reçues, en moyenne, par jour et par cm^2 de surface horizontale, au cours de chacun des mois d'observations, nous donnons le tableau suivant, qui a été calculé au moyen des coefficients de Geslin et Godard.

La comparaison avec la valeur *moyenne* des chiffres de Paris-St-Maur et de Besançon, ces derniers calculés d'après la même méthode, montre que les résultats obtenus ne sont pas trop déraisonnables :

OBSERVATIONS 1951

	VALEURS MOYENNES		MOYENNE PAR JOUR			
	Paris St-Maur	Besançon	Besançon	Pontarlier	Granges-Ste-Marie	Les Fourgs
Mai	427	396 (?)	398 (?)	392	396	416
Juin	490	437 (?)	383 (?)	541	496	485
Juillet	470	439 (?)	540 (?) 7 jours	648	602	635
Août	397	354 (?)	—	391	399	406
Septembre	299	238 (?)	—	330	339	318
Moyenne	416	373 (?)	404 (?) 1er mai au 7 juillet	460	448	453

L'examen de ces quelques résultats met en relief le caractère beaucoup plus régulier et les variations nettement plus amorties de l'insolation dans la cuvette du Lac de St-Point. Les brouillards agissent pendant les mois de plus forte insolation pour arrêter une partie du rayonnement. Il est moins facile de trouver une explication à la majoration de la radiation pendant les mois de plus faible insolation.

Les variations les plus fortes sont constatées aux Fourgs, nous l'avons vu. C'est dans cette station que l'on a enregistré la valeur journalière la plus élevée (plus de 1 000 calories le 14 juin 1951). La légère supériorité de l'insolation à Pontarlier, au seuil des hautes chaînes, peut s'expliquer assez bien, nous l'avons vu, par rapport au Lac de Saint-Point, en faisant appel aux brouillards matinaux de cette région, et que Pontarlier ne connaît pas. En ce qui concerne la région des Fourgs, on doit incriminer les orages d'été qui seraient plus fréquents encore dans les hautes chaînes que sur le 2e plateau.

En réalité, tout ceci est *très voisin* pour toute la région du Haut-Doubs, et l'on ne peut mettre en évidence que deux faits assez nets :

a) la supériorité probable de la radiation reçue par rapport à Besançon, dans la basse vallée du Doubs.

b) l'égalisation des variations de la radiation dans la cuvette du Lac de Saint-Point, par suite de l'action des brouillards matinaux qui réduisent l'insolation en plein été.

Bien entendu, ces conclusions sont valables seulement pour l'été 1951 ; une étude complète exigerait des observations poursuivies pendant plusieurs années, et il sera intéressant de connaître le résultat de celles qui sont actuellement en cours.

C. - Résultats des observations sous le couvert

Nous exprimons cette fois les radiations en pourcentage des indications de l'actinomètre de référence des Granges-Ste-Marie. C'est le rapport entre les quantités d'alcool distillées par les divers appareils, indications qui ont été rapportées à l'actinomètre-type de MONTSOURIS, selon les caractéristiques de ces appareils. Ces résultats sont traduits dans la fig. 21, où nous avons reporté la hauteur du soleil au-dessus de l'horizon, à son passage au méridien, pour les diverses périodes envisagées.

	Périodes	Parcelle 12 (b-382)	Parcelle 17 (b-434)	Parcelle 13 (b-461)	Parcelle 13 (b-469)	Parcelle 13 B-344)
I	1 au 5 mai ...	—	3,6 %	3,9 %	5 %	20,4 %
II	6 au 12 mai ...	—	2,9 %	4,0 %	6,5 %	18,4 %
III	13 au 19 mai ...	1,1 %	2,7 %	3,8 %	7,5 %	17,5 %
IV	20 au 26 mai ...	1,4 %	4,2 %	5,7 %	9,4 %	18,6 %
V	27 mai au 2 juin.	1,2 %	4,1 %	5,4 %	10,6 %	20,4 %
VI	3 au 9 juin ..	1,3 %	3,7 %	5,1 %	10,5 %	20,6 %
VII	10 au 16 juin ..	1,3 %	3,7 %	4,8 %	9,9 %	26,1 %
VIII	17 au 23 juin ..	1,5 %	3,0 %	4,1 %	9,2 %	21,7 %
IX	24 au 30 juin ..	1,0 %	2,9 %	4,2 %	9,9 %	15,4 %
X	1 au 7 juillet.	1,0 %	2,9 %	3,7 %	7,1 %	21,5 %
XI	8 au 14 juillet.	1,5 %	4,1 %	5,0 %	8,3 %	24,5 %
XII	15 au 21 juillet.	0,9 %	2,9 %	3,6 %	7,1 %	23,6 %
XIII	22 au 28 juillet.	1,1 %	2,9 %	3,6 %	6,2 %	25,0 %
XIV	29 juill. aù 4 août	1,6 %	3,7 %	4,1 %	5,7 %	20,6 %
XV	5 au 11 août ..	1,1 %	3,4 %	4,1 %	5,6 %	19,2 %
XVI	12 au 18 août ..	1,0 %	2,9 %	2,9 %	3,6 %	17,6 %
XVII	19 au 25 août ..	1,4 %	4,1 %	4,1 %	4,8%	15,4 %
XVIII	26 août au 1 sept.	1,4 %	2,8 %	Appareils enlevés		
XIX	2 au 8 sept. ..	1,4 %	2,8 %	coupe en exploitation.		
XX	9 au 15 sept. ..	1,2 %	3,1 %	18 %	18,6 %	22,1 %
XXI	16 au 22 sept. ..	0,9 %	1,8 %	Appareils déplacés		
XXII	23 au 30 sept. ..	1,5 %	4,1 %	20,6 % (?)	20,0 % (?)	15,9 % (?)

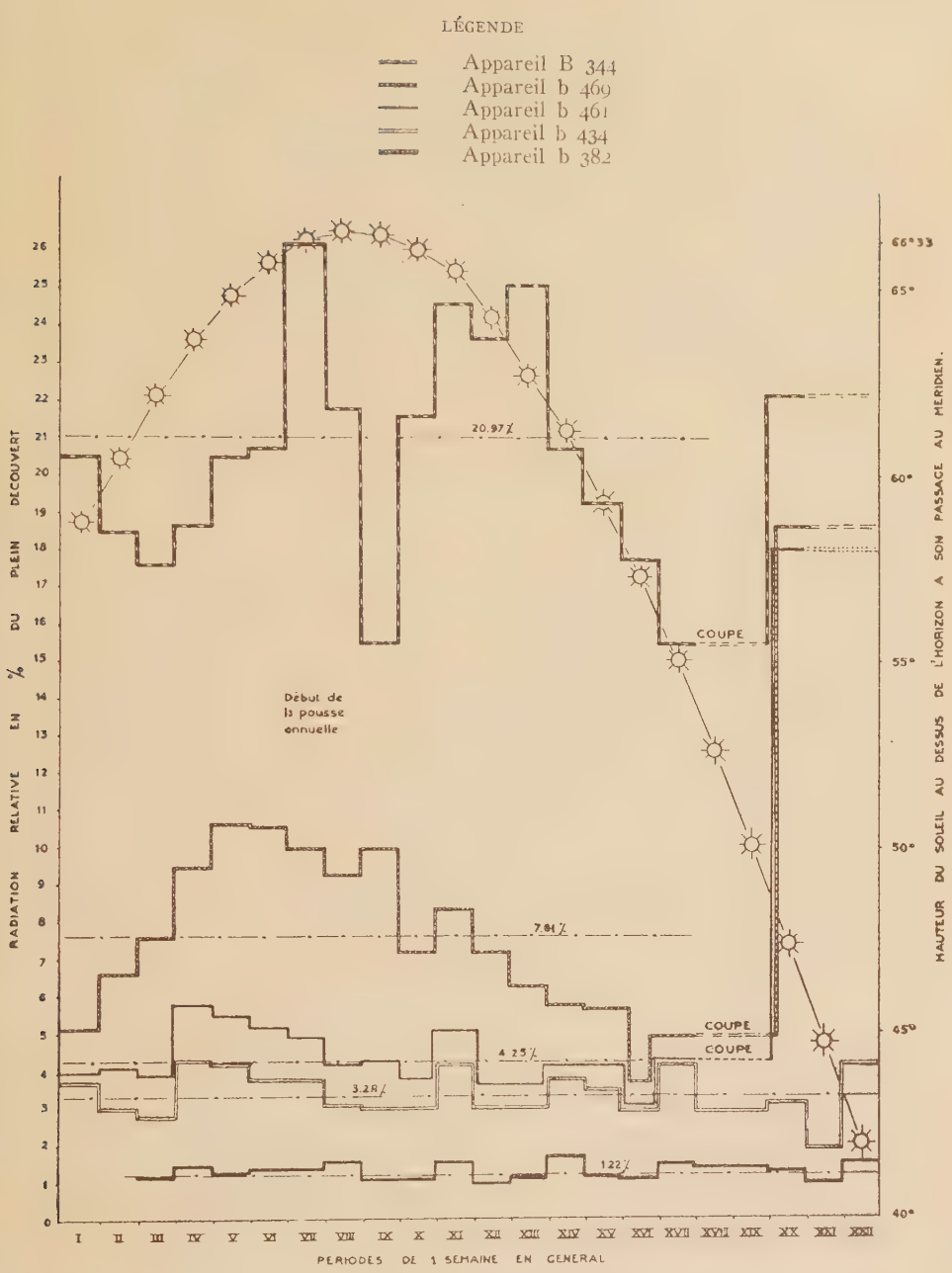


FIG. 21.

Variations de la radiation relative
et de la hauteur du soleil au-dessus de l'horizon
du 1er mai 1951 au 30 septembre 1951
Forêt domaniale de la Gd. Côte - Peuplements résineux divers.

Les résultats moyens, obtenus par rapport entre *le total* des centimètres cubes distillés sous les divers couverts, et *le total* des centimètres cubes distillés par l'appareil des Granges-Ste-Marie, après réduction aux chiffres de l'actinomètre type de MONTSOURIS, sont les suivants :

Station		Pourcentage	Calories par centimètre carré par jour moyen
Granges-Ste-Marie	(B-449)	100 %	448
Forêt Parcelle 12	(b-382)	1,22 %	5,46
— Parcelle 17	(b-434)	3,28 %	14,69
— Parcelle 13	(b-461)	4,25 %	19,04
— Parcelle 13	(b-469)	7,61 %	34,09
— Parcelle 13	(B-344)	20,97 %	93,94

Les chiffres de la parcelle 13 représentent la moyenne avant la coupe.

En ce qui concerne la radiation relative moyenne dans les deux peuplements stables et réguliers sur de vastes surfaces (Parcelles 12 et 17), le premier de 1 650 tiges par hectare, le second de 650 tiges par hectare, on peut remarquer une coincidence très intéressante. Nous avons proposé, en ce qui concerne l'éclairement relatif, la relation empirique :

$$Er = 20/N.$$

En appliquant cette relation à la radiation relative moyenne, nous trouvons :

Parcelle 12 — Rr : 20/1650 : 1,21 % (observé 1,22 %)
Parcelle 17 — Rr : 20/650 : 3,08 % (observé 3,28 %)

Les procédés d'observation étant absolument indépendants (mesures photométriques instantanées répétées par temps couvert — et mesures actinométriques continues pendant 5 mois) la valeur de cette formule empirique qui donnerait une expression approchée de la lumière ou de la radiation relative sous les peuplements résineux assez denses du Haut-Doubs, et probablement ainsi du « facteur de transmission directe et diffuse » du couvert apparaît comme assez intéressante.

En ce qui concerne la trouée décrite plus haut, elle a été choisie d'un diamètre de 20 à 24 mètres selon les orientations ; ce diamètre est à peu près égal à la hauteur des arbres voisins. Plus exactement, à l'Est, au Sud et à l'Ouest, la distance de l'actinomètre aux arbres

les plus proches était approximativement égale à la mi-hauteur de ceux-ci. Au Nord-Est, il y avait un arbre plus rapproché (8 mètres environ pour 22 mètres de hauteur totale), au Nord-Ouest, un petit bouquet d'épicéas naturels de 3 à 6 mètres de hauteur, à une distance de 4 à 5 mètres. En somme, les conditions de la trouée d'un rayon égal à la mi-hauteur des arbres voisins étaient approximativement remplies. La formule théorique donnerait comme valeur de l'éclairement relatif par temps couvert : Er = 20 %.

Or, sur 5 mois d'observation, nous avons relevé une moyenne de 20,97 % ; et il faut remarquer que l'appareil n'était pas au sol, mais à 1,20 m environ de hauteur. Il y a une concordance intéressante, qui rejoint celle constatée dans les mesures photométriques.

On peut cependant se demander ce que deviendront ces chiffres pendant la période hivernale, quand le soleil est plus bas à l'horizon. On aurait sans doute des valeurs plus faibles. Mais l'important est évidemment la concordance pendant la période active de la végétation. Il n'est pas certain, par ailleurs, qu'au cours d'un été prochain, la répartition du temps de présence des nuages soit la même et, partant, la concordance aussi bonne. La formule proposée ne s'appliquait, nous l'avons dit, qu'au cas du temps couvert égal.

Signalons, cependant, que de mai à juillet 1952, un actinomètre installé au centre d'une trouée de 50 m de diamètre environ, dans un peuplement de 30 m de hauteur totale, à Levier, a donné une radiation relative pour 3 mois, de 43 %. La formule de la trouée donne dans ce cas 41 %. Les chiffres sont assez voisins.

Si nous regardons les choses d'un peu plus près, la conclusion est cependant différente. En effet, les actinomètres enregistrent aussi bien la radiation directe que la radiation diffuse. Admettons une proportion très approximative de 50 %, pour chacune d'elles, dans la radiation totale, pendant la période d'observation, et essayons de déterminer la valeur de la radiation relative *théorique*, en utilisant le « cercle d'illumination totale ».

Dans le cas de la trouée observée en 1951 (Grand'Côte), on arrive ainsi au chiffre de 12 %, comme valeur de la radiation relative au centre, alors que l'on a observé près de 21 %. Cependant, si la trouée était de forme assez régulière et si l'actinomètre était placé sensiblement en son centre, les parois en étaient peu épaisses et coupées de certains vides, ce qui a probablement donné lieu à des infiltrations importantes de lumière solaire. De toutes façons, l'accord ne serait pas bien établi ici.

Par contre, dans le cas de la trouée observée en 1952 (Levier), trouée établie dans un peuplement très dense (800 m^3/hectare) et à bords très nettement marqués, le même mode de calcul donne, pour le centre, une radiation relative théorique de 46 % alors que l'on a observé, nous l'avons dit, une radiation relative de 43 %.

Au surplus, dans cette même trouée, nous avions installé deux

autres actinomètres, l'un à l'extrémité nord, l'autre à l'extrémité sud du diamètre passant par l'appareil central. L'actinomètre situé au nord (exposé au sud) a enregistré une radiation relative de 37 % ; celui situé au sud (exposition nord), a enregistré 12 % seulement. Le calcul, par le « cercle d'illumination totale » donne ici respectivement comme radiation relative théorique, 35 et 11 %. L'ordre de grandeur est assez bien respecté.

En ce qui concerne l'influence de la coupe, donnons les précisions suivantes :

Sur l'ensemble de la parcelle 13, la coupe marquée normalement dans cette division a été exploitée à partir du 26 août 1951. Les appareils ont été alors enlevés et réinstallés à partir du 9 septembre.

L'opération a prélevé, sur l'ensemble de la parcelle, environ 30 % du matériel. Dans le secteur où étaient installés les actinomètres, un comptage opéré autour de l'appareil b. 461 a montré que les arbres enlevés représentaient 36 % du nombre des tiges, et 23,5 % du matériel. Il s'agissait d'une première opération de relèvement du couvert. L'appareil b. 469 se trouvait en bordure, l'appareil B. 344 au centre de la trouée.

Les valeurs suivantes de radiation relative ont été obtenues :

	Avant la coupe	Après la coupe
Peuplement (b-461)	4,25 %	18 %
Bordure de la trouée (b-469) ..	7,61 %	18,6 %
Centre de la trouée (B-344) ...	20,97 %	22,1 %

Par suite des débardages qui ont commencé peu de temps après l'exploitation, les appareils ont été déplacés, puis remis en station avec des indications peu différentes pour les 2 premiers, inférieures pour le dernier, qui a été probablement du reste dérangé au cours de ce débardage.

L'allure générale des chiffres montre cependant nettement que le forestier, à l'estime, avait établi une assez bonne égalisation de la radiation dans le peuplement.

Ces résultats ne sont nullement en contradiction avec la formule empirique : Er = 20 N, qui ne s'applique qu'à des peuplements stables et en équilibre réciproque, et non à des massifs qui viennent d'être ouverts par des coupes, et sont encore sous l'effet d'un « choc opératoire » souvent assez brutal.

Il est évident que les cimes vont s'accroître, le couvert se refermer, et que très vite on se rapprochera des chiffres précédents, un peu majorés pourtant. Il sera intéressant, si nous en avons la possibilité, de suivre « actinométriquement », le processus de réextension du couvert. On peut noter toutefois l'apport considérable de ra-

diation réalisé par une opération forte certes, mais non excessive ; un peuplement soumis à un prélèvement de 23,5 % de son matériel initial, voit sa radiation relative majorée de plus de 320 %. Nous avons signalé déjà, grâce à des mesures photométriques, le cas de la parcelle 8 de la forêt communale de Pontarlier (960 tiges et 360 mètres cubes par hectare) où, à la suite d'une coupe de 8 % en volume, portant surtout sur des arbres dominés, l'éclairement relatif était passé de 2,5 à 4,5 %, soit en majoration de 80 % environ. Ces considérations confirment l'allure en « dents de scie » de la courbe figurant les variations de la radiation ou de l'éclairement relatif, à l'intérieur d'un peuplement soumis à des coupes successives — et la nécessité, si l'on veut maintenir un climat lumineux donné, de passer souvent et légèrement plutôt que rarement et lourdement.

(Dans le cas de la parcelle 13, le peuplement régulier était, ainsi que nous l'avons dit, très réduit, et avait été laissé tel quel en raison du peu d'importance des régénérations d'épicéa subjacentes).

On peut enfin noter l'influence probable de la hauteur du soleil sur l'horizon, et de la pousse annuelle sur cette radiation relative. La fig. 21 semble faire ressortir, assez peu nettement du reste, cette évolution ; majoration pendant les 4 ou 5 premières périodes — puis diminution. Mais, dans les deux peuplements les plus denses (appareils b-382 et b-434), les variations sont très réduites autour de la moyenne générale.

D. - Aspects comparés de la végétation dans les diverses stations

Il est à noter, d'abord, que le printemps 1951 a été très froid, et que la neige a persisté longtemps en forêt. Au moment où nous avons installé l'actinomètre B-344, dans la trouée de la parcelle 13, le 30 avril 1951, il a fallu enlever la neige pour asseoir convenablement le support. La végétation a démarré très lentement. Fin mai, la germination des graines de sapin sous bois commençait à peine. L'épicéa a suivi avec quelque retard. Ce n'est guère qu'au début du mois de juillet qu'il a été possible de se rendre compte de la germination des semences naturelles. Il aurait été intéressant évidemment de suivre, semaine par semaine, l'évolution de la végétation sous les divers couverts et ce, au fur et à mesure que la somme de calories provenant de la radiation solaire augmentait.

Nous n'avons pas eu le temps matériel de procéder à tous ces relevés, et le regrettons. Nous donnerons seulement un petit tableau de l'avancement de l'ensemble de la végétation au début du mois de juillet, puis examinerons, au début d'octobre, l'importance de la croissance annuelle des jeunes plants forestiers sous les divers couverts.

a) **Etat de la végétation au début de juillet 1951**
(relevés sur environ 25 m² par Station)

I. - PARCELLE 12 : 1,22 % de radiations.

Sous-bois de sapins - Sol type rendzine forestière fraîche et profonde.

STRATE ARBORESCENTE :

P	*Abies alba* Mill.	95 %
P	*Picea excelsa* Link.	5 %

STRATE ARBUSTIVE :

P	*Rubus saxatilis* L.	+	1
P	*Sorbus aucuparia* L.	+	1
P	*Lonicera nigra* L.	+	1
P	*Vaccinium myrtillus* L.	+	1

STRATE HERBACÉE :

H	*Carex silvatica* Huds.	+	1
P	*Abies alba* semis de l'année et semis de 4 à 5 ans	+	1
P	*Picea excelsa* peu développés et à pousses minuscules.	+	1
G	*Maianthemum bifolium* (L.) F. W. Sch.	+	1
G	*Paris quadrifolia* L.	+	1
G	*Orchis maculata* L.	+	1
G	*Anemone nemorosa* L.	+	1
H	*Cardamine pratensis* L.	+	1
H	*Vicia sepium* L.	+	1
H	*Geranium robertianum* L.	+	1
H	*Oxalis acetosella* L.	3	2 (*)
H	*Mercurialis perennis* L.	+	1
H	*Viola silvestris* (Lam.) Rchb.	+	1
H	*Epilobium montanum* L.	+	1
H	*Primula elatior* L.	+	1
G	*Asperula odorata* L.	+	1
H	*Phyteuma spicatum* L.	+	1
H	*Crepis paludosa* (L.) Vill.	+	1
H	*Cicerbita muralis* (L.) Wallr.	+	1
H	*Hieracium murorum* l. em Huds.	+	1

STRATE MUSCINALE ..... Très développée.

Sous cette radiation relative faible, la strate arbustive et herbacée a en général un aspect chétif et peu florissant.

Dans tous ces relevés phytosociologiques, la lettre majuscule se réfère à la classification de RAUNKIAER. Le premier signe qui suit le nom de l'espèce donne des indications sur l'abondance (+, 1, 2, 3, 4, 5), le second sur la sociabilité (1, 2, 3, 4, 5), d'après les principes admis en phytosociologie.

(*) fleurie (quelques variétés blanches).

2. — Parcelle 17 : 3,28 % de radiations

Sous-bois de sapins. - Sol type rendzine forestière fraîche et profonde.

Strate arborescente :

P	*Abies alba* Mill.	95 %
P	*Picea excelsa* Link.	5 %

Strate arbustive :

P	*Picea excelsa* Link. (âgés de 30 ans environ)	1	1
P	*Ribes alpinum* L.	+	1
P	*Sorbus aucuparia* L.	+	1
P	*Lonicera nigra* L.	+	1
P	*Viburnum opulus* L.	+	1
P	*Vaccinium myrtillus* L.	+	1

Strate herbacée :

P	*Abies alba* (semis de 1 à 5 ans	1	1
P	*Picea excelsa* Link. encore peu développés)		
H	*Athyrium filix femina* (L.) Roth	+	1
H	*Dryopteris filis mas* (L.) Schott	+	1
H	*Dryopteris austriaca* (Jacq.) Woyn.	+	1
H	*Carex silvatica* Huds.	+	1
H	*Carex stellulata* Good.	+	1
H	*Luzula flavescens* Gaud.	+	1
G	*Polygonatum verticillatum* (L.) All.	+	1
G	*Maianthemum bifolium* (L.) F. W Schmidt	1	1
G	*Orchis latifolia* L.	+	1
G	*Anemone nemorosa* L.	+	1
H	*Asarum europaeum* L.	+	2
H	*Ceratium caespitosum* Gilib.	+	1
H	*Cardamine pratensis* L.	+	1
H	*Fragaria vesca* L.	+	1
H	*Lathyrus vernus* (L.) Bernh.	+	1
H	*Vicia sepium* L.	+	1
H	*Geranium robertianum* L.	+	1
H	*Oxalis acetosella* L.	3	2
H	*Mercurialis perennis* L.	1	1
H	*Euphorbia dulcis* L.	+	1
H	*Viola silvestris* (Lam.) Rchb.	+	2
H	*Epilobium montanum* L.	+	1
H	*Veronica officinalis* L.	+	1
G	*Asperula odorata* L.	1	1
H	*Phyteuma spicatum* L.	+	1
T	*Lampsana communis* L.	+	1
H	*Prenanthes purpurea* L.	+	1
H	*Hieracium murorum* L. em Huds.	+	1
H	*Euphorbia amygdaloides* L.	+	1

Strate muscinale ..... Très développée.

Sous cette radiation relative un peu plus élevée, l'aspect de la végétation est en général plus favorable.

3. — Parcelle 13 : 4,25 % de radiations

Sous-bois de sapins. Sol : rendzine forestière assez superficielle. Affleurements rocheux.

Strate arborescente :				
P	*Abies alba* Mill.	95 %		
P	*Picea excelsa* Link.	5 %		
Strate arbustive :				
P	*Picea excelsa* Link. (âgés de 15 à 25 ans environ, très peu développés)	+	1	
P	*Sorbus aria* (L.) Crantz	+	1	
P	*Rosa pendulina* L.	+	1	
P	*Lonicera nigra* L. (quelques fruits verts)	+	1	
P	*Vaccinium myrtillus* L. (quelques baies vertes)	3	2	(3)
Strate herbacée :				
H	*Asplenium viride* Huds.	+	1	
P	*Abies alba* Mill.	+	1	
P	*Picea excelsa* Link.	+	1	
G	*Polygonatum verticillatum* (L.) All.	+	1	
G	*Dentaria pinnata* Lam. (quelques siliques vertes)	2	1	
H	*Rubus saxatilis* L.	+	1	
H	*Fragaria xesca* L. (quelques fleurs)	+	1	
H	*Geranium robertianum* L. (floraison réduite)	+	1	
H	*Oxalis acetosella* L.	+	1	
H	*Pirola secunda* L.	+	1	
G	*Asperula odorata* L.	+	1	
H	*Prenanthes purpurea* L. (quelques fleurs)	+	1	
H	*Hieracium murorum* L. em Huds. (quelq. fleurs).	+	1	

Strate muscinale ..... Développée.

4. — Parcelle 13 : 7,61 % de radiations.

A douze mètres à l'est du précédent.
Sous-bois de sapins en bordure d'une trouée.
Sol de rendzine forestière superficielle avec affleurements rocheux.

Strate arborescente :			
P	*Abies alba* Mill.	95 %	
P	*Picea excelsa* Link.	5 %	
Strate arbustive :			
P	*Picea excelsa* Link. (âgés de 15 à 25 ans déjà mieux développés)	+	1
P	*Rosa pendulina* L.	+	1
P	*Rubus fruticosus* L.	+	1
P	*Lonicera nigra* L. (fruits verts)	+	1
P	*Vaccinium myrtillus* L. (baies violettes)	2	2
P	*Daphne mezereum* L.	+	1
Strate herbacée :			
H	*Dryopteris filix mas* (L.) Schott.	+	1
H	*Festuca silvatica* Vill.	+	3
G	*Paris quadrifolia* L.	+	1
G	*Dentaria pinnata* Lam. (siliques violettes)	1	1

H	*Rubus saxatilis* L. (fleuri)	+	1
H	*Fragaria vesca* L.	+	1
H	*Lathyrus vernus* (L.) Bernh.	+	1
H	*Geranium robertianum* L. (fleuri)	+	1
H	*Oxalis acetosella* L.	+	1
H	*Viola silvestris* (Lam.) Rchb.	+	1
H	*Epilobium montanum* L.	+	1
H	*Pirola secunda* L.	+	1
H	*Lamium galeobdolon* (L.) Crantz	+	1
H	*Veronica officinalis* L.	+	1
G	*Asperula odorata* L. (fleuri)	+	1
H	*Phyteuma spicatum* L.	+	1
H	*Cicerbita muralis* (L.) Wallroth	+	1
H	*Hieracium murorum* L. em Huds. (fleuri abondamment).	+	1

STRATE MUSCINALE ..... Peu développée

5. — PARCELLE 13 : 20,97 % de radiations

A douze mètres à l'est du précédent. Trouée déjà ancienne sur ancien sous-bois de sapins. Sol de rendzine forestière superficielle avec affleurements rocheux ou rocailleux.

STRATE ARBORESCENTE :

P	*Abies alba* Mill	5 %	
P	*Picea excelsa* Link (de 15 à 30 ans, bien dév.).	95 %	
P	*Salix caprae a* L.	+	1
P	*Fagus sylvatica* L.	+	1

STRATE ARBUSTIVE :

H	*Rubus saxatilis* L. *Rubus idaeus L.* + 1	+	1
P	*Sorbus aucuparia* L.	+	1
P	*Rosa pendulina* L.	+	1
P	*Vaccinium myrtillus* L. (baies presque noires) ..	1	4
H	*Sambucus ebulus* L.	+	1
P	*Lonicera nigra* L. (fruits violacés)	+	1
P	*Ribes alpinum* L. (fruits verts)	+	1

STRATE HERBACÉE :

H	*Athyrium filix femina* (L.) Roth	+	1
H	*Dryopteris filix mas* (L.) Schott	1 (2)	3
P	*Abies alba* Mill (âgés de 1 à 5 ans)	+	1
G	*Millium effusum* L.	+	1
H	*Dactylis glomerata* L.	+	1
H	*Elymus europaeus* L.	+	2
H	*Carex silvatica* Huds.	+	2
G	*Polygonatum verticillatum* (L.) All.	+	1
G	*Paris quadrifolia* L.	+	1
H	*Asarum europaeum* L.	+	2
G	*Dentaria pinnata* Lam. (siliques violettes)	1	1
H	*Fragaria vesca* L. (quelques fruits rouges)	1	2
H	*Lathyrus vernus* (L.) Bernh.	+	1
H	*Vicia sepium* L.	+	1
H	*Sambucus ebulus* L.	1	1
H	*Geranium robertianum* L.	+	1
H	*Oxalis acetosella* L.	+	1

H	*Viola silvestris* (Lam.) Rchb.	+	I
H	*Epilobium angustifolium* L.	+	I
H	*Epilobium montanum* L.	+	I
H	*Pirola seconda* L.	+	I
H	*Primula elatior* L.	+	I
H	*Teucrium scorodonia* L.	+	I
H	*Lamium galeobdolon* (L.) Crantz	+	I
G	*Asperula odorata* L.	+	I
H	*Taraxacum officinale* Weber	+	I
H	*Cicerbita muralis* (L.) Wallr.	+	I
H	*Prenanthes purpurea* L.	+	I
H	*Hieracium murorum* L. em Huds. (fruits abond.)	+	I

STRATE MUSCINALE ..... En voie de nette régression.

Dans les trois dernières stations, les photographies prises au début de septembre peuvent donner cependant une idée de l'état de la végétation au début de juillet 1951.

b) **Examen des plants forestiers au début d'octobre 1951**

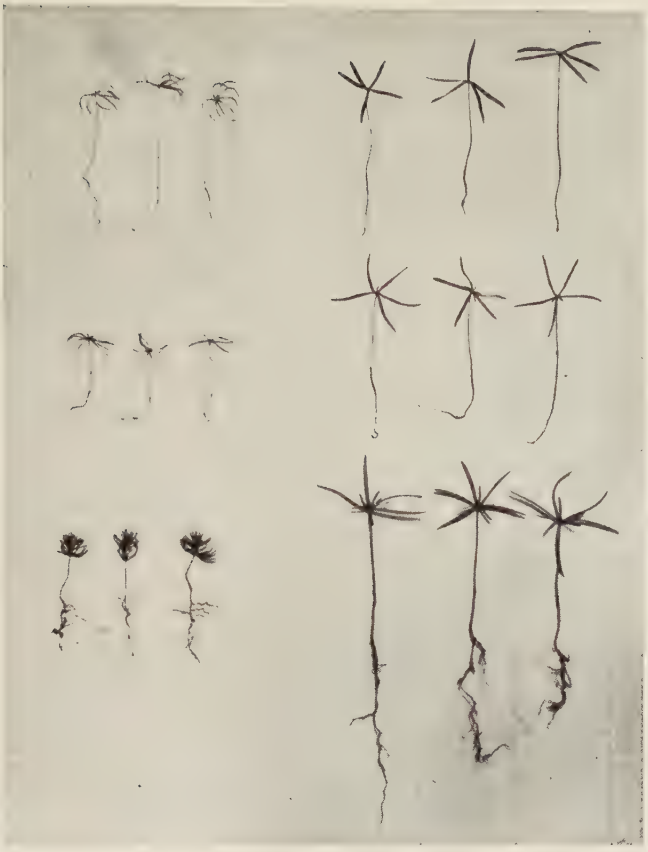
A cette époque, l'on peut considérer la pousse annuelle comme terminée.

Nous avons distingué :

1° L'ÉTAT DES SEMIS DE SAPIN ET D'ÉPICÉA D'UN ÉTÉ (semis effectués en mai 1951 - Voir photographies).

Le sol, rendzine forestière de sous-bois de sapin, est très semblable. Il est absolument identique pour les épicéas situés sous 3,28 % et 98 % de radiations (lignes 2 et 3 de la photographie des semis d'un été). Ce sol provient en effet d'une installation artificielle de cases de végétation, dans laquelle nous voulions essayer de déterminer l'influence de sols pris en pépinière, sous des sapins, des hêtres et des épicéas, sur la croissance de jeunes épicéas placés dans conditions de radiations différentes. Indiquons de suite du reste que, après 3 ans d'essais successifs, il ne semble pas y avoir d'inhibition de germination sur les graines d'épicéa par un sol récolté sous des peuplements de cette espèce. Le chiffre de 3,28 % est celui résultant des indications d'un actinomètre placé à environ 1,20 m du sol. Celui de 98 % n'a pas été mesuré, mais estimé. Il s'agit d'une station de plein découvert, mais dans laquelle les semis étaient très légèrement ombragés le matin par un petit mur situé à l'Est des cases de végétation.

Le seul examen des photographies sur papier millimétré permet de se rendre compte des différences de croissance, même dès la première année, pour l'épicéa et aussi pour le sapin (ces derniers avaient été placés, pour la peine lumière, dans une boîte métallique, et lé-



Etat des semis de l'année au début du mois d'octobre 1951 :
En haut : épicéas et sapins sous une radiation relative de 1,22 %.
Au milieu : épicéas et sapins sous une radiation relative de 3,28 %.
En bas : épicéas et sapins sous une radiation relative voisine de 98 %.

Corrélation observée entre la valeur de l'éclairement relatif et la croissance de l'épicéa : plants de 7 ans situés sous un couvert qui augmente progressivement de gauche (éclairement relatif d'environ 50 %) à droite (éclairement relatif d'environ 5 %).

(Clichés STAINACRE, Pontarlier).

gèrement abrités pendant les jours de grand soleil), suivant qu'ils ont reçu des quantités de radiations différentes. A titre indicatif, signalons que les plants d'épicéa situés dans des sols de pépinière, de sous-bois de sapin et de hêtre, étaient d'aspect identique à ceux ayant cru dans un sol de sous-bois d'épicéa, *pour une radiation relative semblable*.

Les plants d'épicéa situés dans les radiations relatives de 3,28 % et 98 % ont été prélevés en avril 1952 et examinés au microscope (coupes dans le collet, la tigelle, et les cotylédons). Nous indiquerons seulement les résultats obtenus par examen de coupes de la tige hypocotylée, à peu près au même niveau dans les deux plantules. La fig. 22 représente la section de toute l'épaisseur des tissus, de l'épiderme jusqu'au cordon central de parenchyme médullaire. Il est manifeste, d'après cette figure, que la plantule ayant poussé à la lumière, en B, présente des formations ligneuses secondaires beaucoup plus développées que la plantule poussée à l'ombre (en A). Si l'on prend comme repère la pointe extrême du xylème primaire centripète existant à ce niveau dans la plantule très jeune, et dont les vestiges forment une tache irrégulière immédiatement en dedans des éléments d'origine cambiale, on observe, entre ce pôle ligneux centripète et le cambium, de 8 à 11 trachéides secondaires dans la plantule poussée au soleil, et seulement de 3 à 4 dans la plantule poussée à l'ombre. Il y a lieu aussi de remarquer l'épaisseur beaucoup plus grande des parois lignifiées dans la plantule poussée sous une radiation de 98 %, comme le montre la figure 23 (comparer les secteurs de xylème secondaire représentés en 2 pour les plantules). A noter également la différence d'épaisseur des membranes épidermiques (en 1 de A et B, figure 23), et particulièrement le développement considérable de la cuticule pour la plantule poussée au soleil. Un autre caractère enfin à noter est la présence d'éléments mécaniques (figure 22 en B) dans le parenchyme cortical de la plantule poussée en pleine lumière.

Nous avons vérifié, dans des coupes effectuées sur plusieurs individus prélevés dans les deux habitats, la présence de ces différences anatomiques, qui sont d'ailleurs en plein accord avec ce que l'on savait déjà, concernant l'action d'éclairements d'intensités différentes sur la structure anatomique (voir notamment à ce sujet les anciens travaux de Sthal, L. Dufour et le récent ouvrage de R. Combes concernant l'action du milieu sur la morphogénèse).

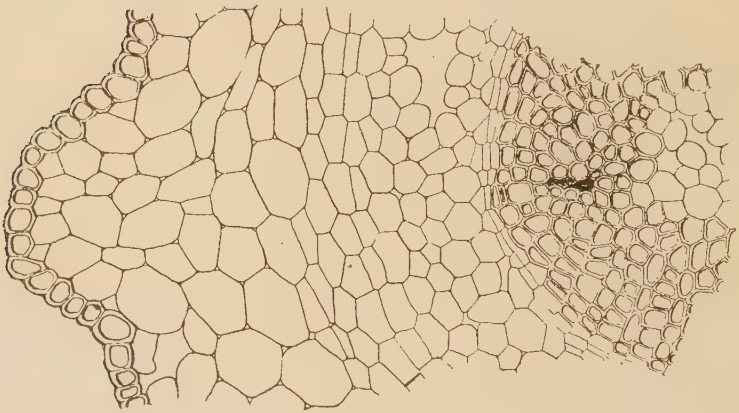
2° L'état des plants d'épicéa de 15 a 25 ans (voir photographies)

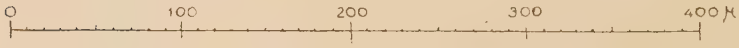
L'âge approximatif des plants étudiés a été au préalable vérifié. Voici les caractéristiques prises à la base (niveau du sol), de trois épicéas :

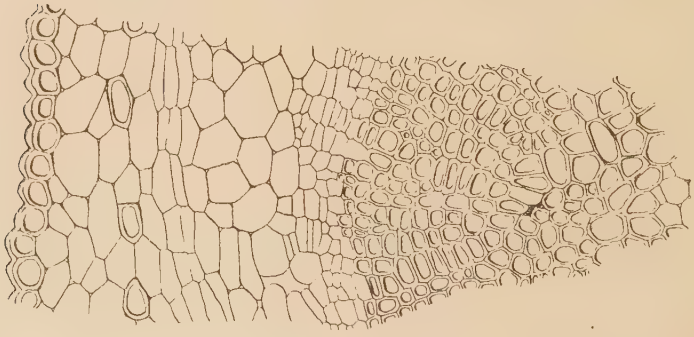
Plantules de *Picea excelsa* (Lamk.) Lk.
germées au début de juin 1951, récoltées en avril 1952.
Section transversale dans la région moyenne de la tige hypocotylée.

A

Radiation relative
3,28 %







B

Radiation relative
98 %

FIG. 22.

Picea excelsa (Lamk.) Lk.
Mêmes plantules, même niveau: 1. épiderme; 2. cambium et trachéides 2ᵉˢ.

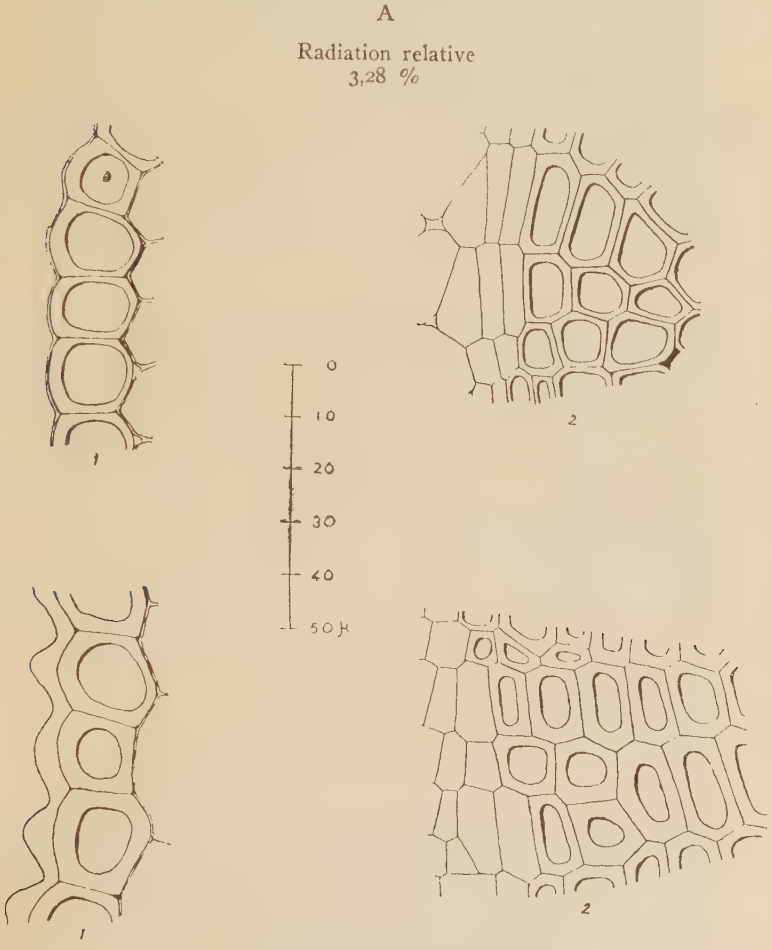


Fig. 23.

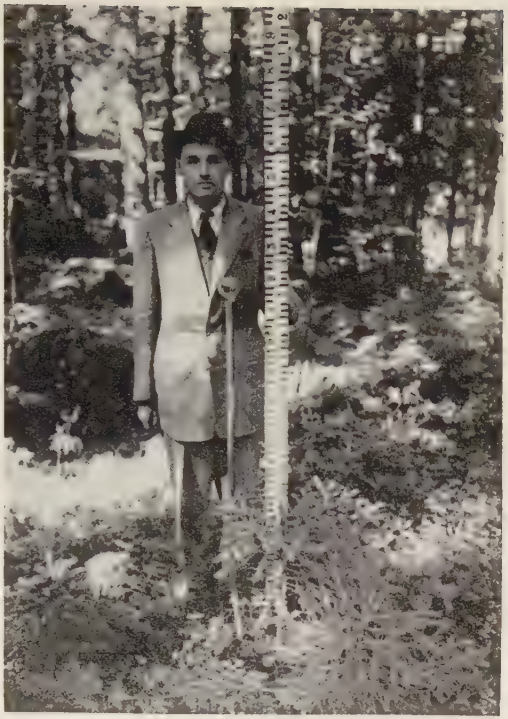
Radiation relative	Diamètre moyen	Nombre de cernes annuels
4,25 %	7 mm	22
7,61 %	27 mm	25
20,97 %	40 mm	21

Nous avons choisi comme test de croissance, la longueur de la pousse annuelle et son diamètre de base, en calculant ainsi le volume formé au cours de l'année de végétation. Nous avons donc mesuré, dans la parcelle 13 les caractéristiques des pousses 1951, et, à titre de comparaison, avons pris les dimensions des pousses d'épicéas en plein découvert, sans doute un peu plus jeunes (10 à 20 ans), situés sur un sol rocailleux peu profond très semblable à celui des 3 places d'observation. Voici les résultats obtenus :

Radiation relative	Dimensions de la pousse (valeurs moyennes) Longueur (en cm)	Diamètre (en cm)	Volume (en cm^3)
4,25 % Peuplement (b-461)	3,5	0,3	0,24
7,61 % Bordure de la trouée (b-469).	7,5	0,5	1,47
20,97 % Trouée (B-344)	25	0,7	9,60
100 % Plein découvert	65	1,5	115,72

Ce petit tableau vient confirmer de façon tout à fait frappante les résultats des mesures photométriques que nous avions déjà données, et tous ces résultats, rassemblés dans la figure 24, concordent pour mettre en évidence l'action éminemment favorable, semble-t-il, de la lumière ou de la radiation sur la croissance de l'épicéa.

On peut remarquer, du reste, que si l'épicéa montre une certaine tolérance, en ce sens qu'il ne meurt pas, lorsqu'il ne dispose que d'un rayonnement faible — il n'en apparaît pas moins comme manifestant alors une croissance *très réduite*. Il n'est pas question ici de phénomène d'adaptation, du genre de celui découvert par Rosse pour le « *Teucrium scorodonia* », par exemple, plante qui arrive rapidement à réaliser une activité photosynthétique égale lorsqu'elle pousse sous des éclairements gradués respectivement comme 1, 2 et 3. A 4,25 % de radiations, l'épicéa du Haut-Doubs, dont l'âge minimum de 20 ans a été déterminé, à une hauteur totale de 30 à 50 centimètres, et continue à faire des pousses régulières de 3 à 4 centimètres. A quelques mètres de là, l'épicéa de même



Station 3.
Radiation relative
4,25 %

Etat des stations 3, 4 et 5 au début de septembre 1951.
Station 4
Radiation relative
7,61 %

Station 5
Radiation relative
20,97 %

âge, qui dispose d'une radiation de 7,61 %, a une hauteur au moins double, avec des pousses de 5 à 10 cm, souvent davantage. A 20,97 % de radiations, c'est un arbuste de 3 à 6 mètres de hauteur. Au niveau supérieur, les pousses atteignent 20, 30 et même 40 centimètres. Il est à remarquer que, à cet endroit (3 à 6 mètres de hauteur), la radiation relative est sûrement supérieure à 20,97 %, valeur obtenue à 1,20 m du sol. C'est la raison pour laquelle nous avons, un

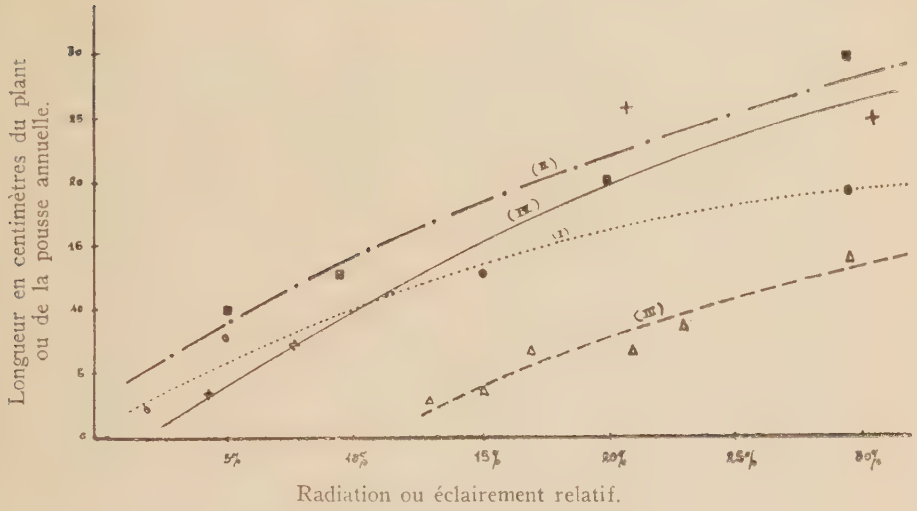


FIG. 24.
Influence possible de la radiation ou de l'éclairement relatif sur la croissance de l'Epicéa.

- I Hauteur totale du plant de 4 ans (1943-1946).
- II Hauteur totale du plant de 7 ans (1943-1949).
- III Longueur de la pousse 1948 de plants de 15 à 20 ans (Levier).
- IV Longueur de la pousse 1951 de plants de 15 à 20 ans (Gd Côte).

peu arbitrairement, arrêté à 25 centimètres, le chiffre exprimant la longueur moyenne de la pousse annuelle dans une radiation relative de 20,97 %.

Nous nous sommes demandé également si, dans le cas des cases de végétation (voir parag. b- 1er ci-dessus) l'influence de la radiation sur le sol n'était pas le facteur déterminant de la croissance, plutôt que l'action directe sur la fonction chlorophylienne des jeunes plantules. GALINAT (1947), après des essais en enceinte fermée pense que « la rencontre des rayons solaires avec le sol semble être le facteur dominant de la croissance ».

Duchaufour (1951) a montré l'influence très nette de la chaleur (donc de la radiation solaire) sur la transformation de l'azote de l'humus en azote minéral assimilable, en étuve à 30°.

Les sols d'épicéa, de hêtre et de sapin, pris sous bois dans une radiation relative de 4 à 5 %, et mis brusquement en plein découver, pouvaient manifester cette minéralisation active, et provoquer ainsi l'aspect florissant des jeunes plantules placées en pleine lumière. Nous n'avons cependant retenu cette cause que comme très particlle. En effet :

1° La case contenant de la terre de pépinière, insolée en permanence, a fourni, sous 3,25 % comme sous 98 % de la radiation, des plants d'aspect absolument identique, nous l'avons dit, à ceux des autres cases dans les mêmes conditions de lumière.

2° L'accélération de la croissance des épicéas par le simple dégagement de leur flèche, alors que leurs pieds et tout le sol environnant restent très ombragés, est un fait trop connu pour que l'on puisse attribuer une part très active à l'action des rayons solaires sur le sol lui-même.

3° Dans de nombreuses plantations ou régénérations naturelles d'épicéa, le sol reste *constamment couvert*. La radiation solaire y est de l'ordre de 0,5 %, et le milieu est frais et humide. Ceci n'empêche nullement ces très jeunes peuplements, une fois leur pousse partie, de se développer parfaitement, et de donner un croissance parfois luxuriante, alors que seuls, leurs cimes et leurs appareils foliacés supérieurs se trouvent exposés à la lumière naturelle. A l'inverse, c'est rarement sur un sol très insolé que les graines d'épicéa germent et donnent des régénérations satisfaisantes, ceci, du reste, en raison de la forte concurrence des autres végétaux dans les stations naturelles.

CONCLUSION

Point n'est besoin d'avoir une grande habitude de la recherche scientifique pour se rendre compte combien il est difficile de tirer des conclusions précises dans un domaine aussi vaste que ne l'est celui de la physiologie végétale.

L'action favorable ou défavorable des différents facteurs qui entrent en jeu, le fait que la plupart même d'entre eux ont successivement, et suivant leur intensité, une action utile ou nuisible sur la végétation, l'intervention d'éléments auxquels on n'avait pas pris garde, et dont le rôle important est mis chaque jour en évidence par de nouveaux travaux, font du problème global de la croissance des végétaux en général et de celle des essences forestières en particulier, quelque chose d'infiniment complexe ; ceci nous amènerait tout naturellement à terminer cette étude par un vaste point d'interrogation.

Cependant, il serait très utile, du point de vue pratique, de tenter de dominer le problème et, au lieu de se borner à relever une multitude d'effets partiels, d'essayer de voir si, en définitive, on peut tirer une conclusion au sujet des effets globaux, positif ou négatifs du reste, de la lumière sur la végétation. Ce qui intéresse en effet le forestier n'est pas tellement de savoir si, en laboratoire, un plant d'épicéa cultivé en milieu nutritif donné, et en atmosphère conditionnée, réagit plus ou moins favorablement à l'intensité lumineuse graduée fournie par une source artificielle — mais de connaître comment, dans les conditions moyennes de son habitat naturel, il accueille l'apport de radiations supplémentaires réalisé par une coupe d'intensité donnée, si l'ensemble des facteurs favorables à sa croissance, qui ont pu être ainsi accrus, l'emporte sur l'ensemble des facteurs défavorables qui, eux aussi, ont pu être majorés.

Nous avons vu que l'opinion de la majorité des forestiers, qu'il s'agisse du reste d'auteurs à la compétence incontestée, ou de simples exécutants se fiant à leurs observations personnelles, est qu'il existe vraiment des essences de lumière (chêne, pin, sans doute épicéa, dans le Haut-Doubs), lesquelles, pour se développer, nécessitent une mise en lumière progressive, mais cependant assez rapide. Si cette unique condition n'est pas remplie, le plant périclite ou meurt. Cette opinion concorde du reste parfaitement avec la théo-

rie scientifique élémentaire au sujet du rôle indispensable de la lumière en matière de photosynthèse.

Dans les recherches que nous avons entreprises, nous avons d'abord essayé de déterminer de façon théorique, les conditions de répartition de la lumière en forêt. Deux cas extrêmes sont envisagés : celui du ciel couvert égal agissant comme un diffuseur parfait — et celui du ciel pur ensoleillé agissant également comme un diffuseur parfait auquel se superpose le soleil, source supplémentaire mobile de lumière dirigée. Des considérations photométriques et astronomiques permettent d'établir une figure dite « cercle d'illumination totale », sur laquelle on peut déterminer graphiquement, pour un certain nombre de cas simples, les valeurs de l'éclairement relatif en lumière diffuse, et de l'insolation relative en lumière solaire directe. Une formule mathématique est établie pour le cas particulier de la trouée circulaire.

Par ailleurs, nous avons effectué, depuis plusieurs années un certain nombre de mesures photométriques instantanées, surtout par temps couvert, en utilisant une cellule photoélectrique montée en brillancemètre. Différentes valeurs ont été obtenues suivant la consistance des peuplements, et une formule empirique a été proposée, reliant la valeur de l'éclairement relatif à la densité des tiges par hectare. L'action de la lumière a été reconnue comme très favorable au développement du sapin, et surtout de l'épicéa. En particulier, on a estimé que les jeunes sujets pouvaient fournir, toutes autres conditions étant favorables, une croissance égale à la moitié de celle obtenue en plein découvert, lorsque l'éclairement relatif était de 10 à 15 % pour le sapin, et de 25 à 30 % pour l'épicéa.

D'autre part, nous avons procédé à des mesures actinométriques continues pendant 5 mois en 1951 et 1952 (1er mai au 1er octobre). 9 actinomètres de Bellani à distillation étaient installés dans des stations de plein découvert, et sous des couverts divers. Les levés effectués périodiquement ont permis de confirmer les conclusions générales ci-dessus : la radiation relative est d'autant plus faible que le peuplement est plus dense, la formule empirique mentionnée plus haut s'appliquant de façon satisfaisante dans ce cas. Les jeunes épicéas, spécialement étudiés, se sont montrés très sensibles à la réduction de cette radiation. Les plants de un an restent grêles et filiformes et forment peu de bois sous le couvert. Des plants de 20 à 25 ans, d'âge bien déterminé, et situés dans des stations très semblables et très proches, ont pris des aspects très différents et ont manifesté des croissances extrêmement variées, suivant qu'ils étaient placés sous des radiations relatives de l'ordre de 4, 8, 21 et 100 %.

En résumé, il semble qu'en envisageant tout au moins le cas de l'épicéa, l'opinion des forestiers praticiens au sujet de l'existence et du comportement des essences de lumière serait tout à fait justifiée.

Pour d'autres essences, les chercheurs qui, depuis un demi-siècle, s'efforcent, avec des appareils de plus en plus perfectionnés, d'apporter des précisions chiffrées à ce problème, donnent des conclusions qui semblent bien favorables également à ce point de vue. Cependant, des expériences assez récentes paraissent mettre en évidence un rôle prédominant de l'eau du sol ; les découvertes sur les auxines et leur inactivation par la lumière soulèvent des problèmes assez difficiles d'interprétation au sujet de la croissance des essences de lumière. Il y a là certains faits bien établis dont il convient de tenir compte, mais nous pensons, en particulier, que l'application de la loi du minimum, et des hypothèses très simples au sujet des auxines permettent de comprendre, du point de vue théorique, un phénomène qu'il est difficile de nier, *à savoir la réaction très favorable de croissance manifestée par de nombreux plants forestiers à la diminution du couvert qui les surplombe*. Il semble donc très naturel de tirer certaines conclusions pratiques de cette considération :

a) **Dans le domaine de la sylviculture**

S'il est vraiment bien établi que beaucoup d'essences demandent « de la lumière » pour prospérer, on sait très mal actuellement chiffrer ces besoins.

D'où la nécessité, qui paraîtrait maintenant évidente, de multiplier, pour différentes essences et dans différentes stations, des mesures de l'ordre de celles que nous avons poursuivies. Du reste, si la méthode photométrique instantanée par temps couvert donne des indications déjà assez intéressantes, notre préférence va à la méthode actinométrique continue, qui semble présenter, du point de vue de la valeur des résultats, des garanties supérieures, puisqu'ils intéressent *toute* la période de végétation, et non des moments donnés de celle-ci.

En ce qui concerne spécialement l'épicéa, si l'on admet qu'un jeune sujet doit fournir dans une coupe en régénération, au minimum une croissance moitié moindre que celle qu'il atteint en plein découvert, on trouve que la radiation suffisante n'existe que sous des peuplements très clairs (75 à 100 tiges par hectare) ou au centre de trouées ayant au minimum un diamètre égal à la hauteur des arbres voisins. Cette conclusion est valable pour le Haut-Doubs, avec un sol argilo-calcaire, et un climat humide et frais assez bien caractérisés. Elle serait sans doute différente ailleurs.

Le problème de la régénération du chêne recevait peut-être (« ne sutor... ») une solution intéressante s'il était envisagé de ce point de vue.

Les pins, le mélèze, eux aussi, bénéficieraient sans doute de recherches analogues.

Il est bien évident, par ailleurs, que même les essences d'ombre, comme le hêtre ou le sapin, tireraient profit de précisions chiffrées en ce qui concerne leurs exigences minima.

Il serait utile également de déterminer, d'après les mêmes principes, l'abri nécessaire à certains jeunes plants en pépinière — les termes employés en cette matière étant extrêmement vagues et imprécis.

Il n'est même nullement interdit d'imaginer, une fois les caractéristiques optima déterminées pour les principales essences, un système de claies mobiles abritant les planches de semis et commandées par des relais photo-électriques. Des dispositifs de ce genre ont déjà reçu de nombreuses applications industrielles.

b) **Dans le domaine de l'aménagement,**

qui doit, évidemment, être lié aux conditions naturelles de régénération des essences, on pourrait sans doute trouver ici des arguments en faveur du traitement en futaie régulière des essences de lumière. Si l'on admet, en effet, qu'un quart de la surface totale de la forêt doit être consacré à la naissance et à la formation des très jeunes peuplements, on peut remarquer que la radiation suffisante sera très facilement apportée aux jeunes renaissances lorsqu'elles sont rassemblées en parcelles entières, mais que, dans le cas de la futaie jardinée même par larges trouées (d'un diamètre double de la hauteur des arbres voisins), il faudrait que ces trouées occupent une surface égale à la moitié de celle de la forêt, pour apporter, sur un quart seulement de cette surface, la lumière nécessaire à la croissance normale des jeunes épicéas. On sera donc obligé, soit de réduire la croissance des peuplements jeunes, soit de diminuer fortement le matériel producteur. Ce sont là, du reste, des arguments théoriques, et il ne convient pas d'y attacher une importance exagérée.

*
* *

Le forestier n'a jamais été le « gestionnaire infécond... » qu'ont voulu voir en lui certains esprits mal informés, ou mal intentionnés.

En contact permanent avec la forêt, il a toujours su tirer parti des observations qu'il effectuait pour orienter au mieux la production des massifs confiés à sa surveillance.

Mais ses moyens naturels sont limités ; la science se développe, et il doit faire appel à des procédés, à des instruments plus précis que ses propres sens, de façon à connaître toujours mieux les conditions d'installation et de croissance des peuplements, pour en tirer toujours plus de produits, et contribuer ainsi, par son action efficace, à augmenter le bien-être de l'humanité.

BIBLIOGRAPHIE

Nous mentionnons que nous avons fait de larges emprunts à la Bibliographie citée dans les ouvrages de SHIRLEY H.-L., en ce qui concerne les auteurs américains et anglais, pour la période antérieure à 1940.

ALVIK (G.). — Ueber Assimilation und Atmung einiger Holzgewächse im westnorwegischen Winter. *Med. Vestl. forstl. Fors.* Bergen, 1939.

D'ARBOIS DE JUBAINVILLE. — Recherches sur le taillis-sous-futaie. Nancy, 1860.

ARCICHOVSKY (V.). — Eine neue methode zur Messung des relativen Lichtgenuss der Pflantzen. Planta, 1932.

ATKINS (W.-R.-G.). — The measurement of daylight in relation to the plant growth. *Empire Journ. Fores.*, 1932.

ATKINS (W.-R.-G.) et POOLE (H.-H.). — Photo electric measurements of illumination in relation to plant distribution. *Sci. Proc. Royal Dublin Soc.*, 1929-1931.

AUBRÉVILLE (A.). — Observations d'Ecologie générale. *Agronomie Tropicale française*, nov.-déc. 1947.

BADOUX. — Lichtversuche mit Deckgittern Schwerz Central F.V.M. Suisse, 1898.

BAILLAUD (R.) et JACOULET (M.). — *Bulletins météorologiques annuels de l'Observatoire National de Besançon.*

BAKER (F.-S.). — Effects of shade upon coniferous seedlings grown in nutrient solutions. *Jour. Fores.*, 1945.

BAKER (F.-S.). — Principles of sylviculture U.S.A., 1950.

BALAKAN (K.). — Light relation in beech, pine and spruce forest. *Lesnicka Prace*, 1942.

BARNEY (C.-W.). — The effect of the light intensity on the root growth of loblolly pine. *Sci. Soc. U.S.A.*, 1947.

BARNEY (C.-W.). — Effects of soil temperature and light intensity on root growth of loblolly pine seedlings. *Plant Phys.*, 1951.

BENEDICT (H.-M.). — Effect of ultraviolet radiation on growth and on the calcium and phosphorus contents of plants. *Bot. Gaz.*, 1934

BERGMANN (L.). — Versuche und Messungen mit Selensperrschicht-Photozellen. *Phys. Zeits.*, 1930.

BERNER (E.-J.). — Chlorophyll production by young coniferous plants at different light intensities. *Un. Berg. Arb. Naturvit. Rekke*, 1949.

BILLINGS (W.-D.) et MORRIS (R.-J.). — Reflection of visible and infrared radiations from leaves of different ecological groupes. *Am. Jour. Bot.*, 1951.

BLACKMAN (F.). — Optima and limitings factors. *Ann. Bot.*, 1905.

BLACKMAN (G.-E.) et WILSON (G.-L.). — The constancy for different species of a logarithmic relationship between net assimilation rate and light intensity, and its ecological significance. *Ann. Bot. G. B.*, 1951.

BÖNNING (E.). — *Planta*, 1937.

BOURGEOIS (A.). — Production des épicéas de qualité. *Bulletin Société Forestière de Franche-Comté.* Juin 1942.

Braun-Blanquet. — *Pflanzensoziologie*. Nouvelle édition. Vienne, 1951.
Breazeale (E.-L.), Mac George (W.-T.) et Breazeale (J.-F.). — Nutrition of plants considered as an electrical phenomenon. A new approach. *Soil. Sci. U.S.A.*, 1951.
Brocks (K.). — Die räumliche Verteilung der Beleuchtungsstärke im Walde. *Zeits. für Forst. u. Jagd wesen*, 1939.
Broglie (L. de). — Matière et Lumière. Paris, 1937.
Brunt (D.). — Some factors in micro-climatology. *Quart. Jour. meteorol. Soc. G. B.*, 1946.
Buli (U.). — Radiazone solare e cicli meristématici nella pinetta di Ravenna. *Coelum Ital.*, 1949.
Bureau des Longitudes. — Annuaire 1952, Paris.
Burk (D.), Hendricks (S.), Korzenovsky (M.), Schocken (V.) et Warburg (O.). — The maximum efficiency of photosynthesis: a rediscovery. *Science U.S.A.*, 1949.
Burns (G.-R.). — A portable instrument for measuring solar radiation in the forests. *Vermont Agr. Exp. Sta. Bull.*, 1927.
Burns (G.-R.). — Measurements of light by thermopiles. *Ecology*, 1931.
Burns (G.-R.). — Photosynthesis in various portions of spectrum. *Plant. Phys.*, 1933.
Boyko (H.). — The decisives role of direct sun-radiation in the distribution of *Quercus aegilops* L. in Palestine. *Pal. Jour. Bot.*, 1947.
Boysen-Jensen (P.). — Nombreuses études. Copenhague, 1910-1933.
Boysen-Jensen (P.). — Die Stoffproduktion der Pflanzen. Jena, 1932.
Carles (J.). — Géographie botanique. Paris, 1948.
Cheo (K.-H.). — Ecological change due to thinning red pine. *Jour. Fores.*, 1946.
Chodat (F.). — Influence de la lumière sur la transpiration végétale. Genève, 1933.
Chouard (P.). — Dormances et inhibitions des graines et des bourgeons. Paris, 1951.
Chouard (P.). — Les progrès récents dans la connaissance et l'emploi des substances de croissance. Le Mans, 1949.
Chouard (P.). — Expérience de longue durée sur le photopériodisme *Soc. Bot. France*, 1949.
Clements. — Research methods in ecology. *Uni. Publ. C° Lincoln Nel.*, 1905.
Clements (F.-L.) et Long (F.-L.). — Factors in elongation and expansion under reduced light intensity. *Plant. Phys.*, 1934.
Combes (R.). — La forme des végétaux et le milieu. Paris, 1946.
Curtis (O.-F.) et Clark (D.-G.). — An introduction to plant physiology-2-Foods and photosynthesis. New York - Toronto - London, 1950.
Daniel. — Solar energy. *Science U.S.A.*, 1949.
Daxer (H.). — Ueber die Assimilationsökologie der Walbodenflora. *Jahr. Wiss. Bott.*, 1934.
Deker (J.-P.). — The effect of air supply on apparent photosynthesis. *Plant Physiology*, 1947.
Deribere (M.). — La lumière artificielle - l'ultra-violet - l'infra-rouge. Bruxelles, 1950.
Duchaufour (Ph.). — Sur la minéralisation de l'Azote dans les humus forestiers. *C.R. Ac. Agriculture de France*, 1951.
Dufour (L.). — *Ann. Sc. Nat. Bot.*, 1877.
Emerson (R.) et Lewis (C.-M.). — Carbon dioxide exchange and the measurement of the quantum yield of photocynthesis. *Amer. Jour. Botan.*, 1941.
Esclandon (E.). — Les répercussions de l'activité solaire ou cosmique sur certains phénomènes de biologie végétale. *C. R. Aca. Sci. Paris*, 1943.
Espino (R.-B.) et Panataleon (F.). — Influence of light upon growth and developpement of plants with special reference to the comparative effects of morninglight and of the afternoon light. *Phil. Agric.*, 1931.

FABRICIUS (L.). — Der Einfluss des Wurzelwettbeverbs des Schirmstandes auf die Entwiklung des Jungwuchses. *Forstwiss. Centralblat*, 1937.
FABRY (Ch.). — Encyclopédie photométrique. Introduction générale à la photométrie. Paris, 1927.
FARROWW (B.) et PELTON (M.-O.). — A photographic daylight recorder. *Jour. Sci. Instr.*, 1945.
FRICKE (K.). — Licht und Schatten holzarten. *Centralb. Gesam. Forst.*, 1904.
FULLER (H.-J.). — Carbon dioxide concentration of the atmosphere above Illinois forest and grassland. *Amer. Mit. Nat.*, 1948.
FUNKE (G.-L.). — On the influence of light of different wave lenghts an the growth of plants. *Rec. Trav. Bot Neerl.*, 1931.
GABRIELSEN (E.-K.). — Die Kohlensäureassimilation der Laubblätter in verschiedenen Spektralgebieten. *Planta*, 1935.
GABRIELSEN (E.-K.). — Quantum efficiency in photosynthesis. *Experientia*. Suisse, 1947.
GALINAT (M.). — Végétation en enceinte fermée. *Rev. Hort. Fr.*, 1947.
GARNER (W.-W.) et ALLARD (H.-A.). — Effect of the relative length of day and night an other factors of the environnement on growth an reproduction in plants. *Jour. Agric. Res.*, 1920.
GAST (R.-P.). — A thermoelectric radiometer for silvical research. *Harvard Forest bul.*, 1930.
GESLIN (H.) et GODARD (M.). — L'actinomètre à distillation de BELLANI et l'enregistrement de la radiation solaire. *La Météorologie*. Paris, 1940.
GESLIN (H.). — La caractérisation des climats locaux. *Conf. Pédologie Méditerranéenne*, 1947.
GOEBEL (K.). — Ueber die Einwirkung des Lichtes auf die Flächentwicklung der Farnprothallien. *Rev. Bot. Neerl.*, 1928.
GRANDEAU (L.). — Chimie et Physiologie appliquées à l'agriculture et à la sylviculture Nancy, 1879.
GRASOVSKY (A.). — Some aspects of light in the forest. *Bull. Yale Univ. School. For.*, 1929.
GUINIER (Ph.). — Les associations végétales et les types de forêts du Jura. *Congrès des Sociétés Savantes*, 1932.
GUINIER (Ph.), OUDIN (A.) et SCHAEFFER (L.). — Technique forestière. Paris, 1947.
HAGENE (P.). — Recherches d'actinométrie écologique sur la radiation reçue sous un arbre isolé. 1941.
HALL (R.-C.). — A simple inexpensive instrument for the measurement of light. *Ecology*, 1932.
HENCKEL (P.-A.) et LITVINOV. — Ueber die Jahrlichen Veränderungen der Photosynthesefähigkeit bei einigen Pflanzen. *Bull. Inst. Rech. Biol.*, 1930.
HENRY (A.). — L'actinomètre à distillation de BELLANI. *La Météorologie*. Paris, 1926.
HIBBARD (R.-P.) et GRISBY (B.-H.). — Relations of light, potassium and calcium deficiences to photosynthesis, protein synthesis and translocation. *Mich. Agr. Exp. stu. Tech. Bull.*, 1934.
HIBBEN (S.-C.). — Influence of colored light on plant growth. *Trans. Ill. Eng. Soc.*, 1924.
HICKEL (R.). — Ombre et lumière. *Bulletin Société forestière de Franche-Comté*. Mars-juin, 1934.
HOFFMANN (E.). — Der Ausdruck optimalen Lichtgenuss im Blattbau der Pflantze. *Bot. Arch.*, 1927.
HOLCH (A.-E.). — Development of roots and schoots of certain deciduous seedlings in different forest sites. *Ecol.*, 1931.
HOWLETT (B.-A.). — The design and use of a photoelectric photometer. *Proc. Ind. Aca. Sci.*, 1933.
HUBER (B.). — Die Jahresringe des Baume als Hilfmittel der Klimatologie und Chronologie. *Naturwiss. Dtsch.*, 1948.

Huffel (G.). — Economie Forestière. Paris, 1936.
Ivanov (L.-A.). — Lichtbedingungen in Buchenwäldern in der Krim. Izv. Leningrad. *Lesn. Inst.*, 1927.
Ivanov (L.-A.). — Solar radiation as an ecological factor. *Bull. Appl. Bot. Gen. and Plant. Breed. Leningrad*, 1928.
Ivanov (L.-S.) et Kossowich (N.-L.). — Ueber die Arbeit der Assimilations apparates Verschiedener Baumarten. *Planta*, 1929.
Ivanov (L.-A.) et Orlova (I.-M.-K.). — Zur Frage über die Winterassimilation von Kohlensaüre unserer Nadelhölzer. *Zhurn. Russk. Bot. Obshch.*, 1931.
Jarlan (H.). — Le soleil et son rayonnement. Paris, 1946.
Jayle (G.) et Ourgaud (A.). — La vision nocturne et ses troubles. Paris, 1950.
Johnson (E.-S.). — The function of radiation in the physiology of plants. *Smiths. Misc. Coll.*, 1932.
Kaempfert (W.). — Einfluss der Pflanzrichtung. Weite und- Höhe auf die Besonnungszeit und- dauer. *Biokl. Beibl.*, 1943.
Kimball (H.-H.). — Records of total radiation intensity an their relation to daylight intensity. *Monthly Weather. Rev.*, 1924.
Kimball (H.-H.). — Intensity of solar radiation at the surface of the earth and its variations with latitude, altitude, season and time of the day. *Monthly Weath. Rev.*, 1935.
Knuchel (H.). — Spectrophotométrische Untersuchungen im Walde. Zurich, 1914.
Kögl (F.). — Hope Seyler, 2, *Physiol. Chem.*, 1944.
Korstian (C.-F.). — Some ecological effects of shading coniferous nursery. *Ecology*, 1925.
Korstian (C.-F.). — Plant competition under forest canopies. Abst. *Bull. Ecol. Soc. Americ.*, 1934.
Kossowich (N.-L.). — La photosynthèse du sapin. Leningrad. *Ac. Sc. U.R.S.S.*, 1945.
Kostytschev (S.), Bazyrina (K.) et Tschesnokov (W.). — Untersuchungen über die Photosynthèse der Laubblätter unter natürlichen Verhältnissen. *Planta*, 1928.
Kramer (P.-J.) et Walter (S.-C.). — A comparison of photosynthesis in individual pine needles andentire seedlings at various light intensities. *Plant. Physiology*, 1947.
Kramer (P.-J.). — Plant and soil water relationships. New York. Toronto London, 1949.
Kurssanow (A.-L.). —Uber die Einfluss der Kohlenhydrate auf den Tages-Verlauf der photosynthese. *Planta*, 1933.
Lange (B.). — Ueber eine neue Art von Photozollen. *Phys. Zeits.*, 1930.
Lauscher (F.) et Schwalb (W.). — Untersuchungen über die Helligkeit im Wald und am Waldrand. *Bioklima. Beibl. der Meteor Zeits.*, 1934.
Lauscher (F.). — Lichtmessungen in dienste der Land und Forstwirschaft. Vienne, 1934.
Leman (V.-M.). — Accélération du développement de quelques conifères sous l'action d'un éclairement continu. *Dokl. Akad. Nauk. U.R.S.S.*, 1950.
Leméé (G.). — Recherches écologiques sur la végétation du Perche. Paris, 1937.
Lipmaa (T.). — Pflanzenökologie Untersuchungen. *Acta Inst. Hort. Bot. Tartuensis*, 1929.
Li Tsi-Kung. — The effect of intense sunlight on tree seedlings. *Lingnan . Science Journal*, 1928.
Lobel (L.) et Dubois (M.). — Manuel de Sensitométrie. Paris, 1929.
Lojkin (M.). — Some effects of ultraviolet rays in the vitamin D content of plants as compared with the direct irradiation of the animal. *Cont. Boyce. Thomp. Inst. Plant. Res.*, 1931.

LUNDEGARDH (H.). — Klima und Boden in ihrer Wirkung auf das Pflanzenleben-Jena, 1925.
LUNDEGARDH (H.). — Environment and plant development. Londres, 1931.
LUNEZ (G.). — La lumière et les forêts. *Bull. Soc. Fores. Cent. Belgique.* 1932.
MARESQUELLE (H.-J.). — Les idées modernes concernant le mécanisme de la photosynthèse. *Phytobiologia,* Paris, 1941.
MARINESCO (N.). — Influence des facteurs électriques sur la végétation. Paris, 1932.
MAURAIN (Ch.). — Etude pratique des rayonnements solaires atmosphériques et terrestres. Paris, 1937.
MILLAR (C.-E.) et TURK (L.-M.). — Fundamentals of soil science. New York-London, 1951.
MILLER (E.-S.) et BURR (G.-O.). — Carbon dioxide balance at high light intensities. *Plant Phys.,* 1935.
MÖLLER (C.-M.). — Laubmenge. Stoffverlust und Stoffproduktion des Waldes. Copenhague, 1945.
MORRIS. — Photoelectric cell measurement of crown canopy density. *Jour. Forest.,* 1936.
NÆGELI (W). — Lichtmessungen in Freiland und in geschlossenen Altholzbestanden. Zurich, 1940.
NEURNBERG (K.-E.). — Physikalische Methoden der pflanzlichen Lichtphysiologie. *Abderhalden Hand. Biol. Arbeitsmet.,* 1932.
OLMSTED NORWOOD et J.-D. CURTIS. — Seeds of forest flore. *Ecology,* 1947.
OOSTINGS (H.-J.) et FRAMER (P.-J.). — Water and light in relation to pine reproduction. *Ecology,* 1946.
OPPENHOORTH (W.-F.-F.). — Proc. K. Akad. Wetensch. Amsterdam, 1939.
ORTH (R.). — Strahlung, Lichtfeld und Pflanze- Bioklima - *Beibl. der Meteor. Zeits,* 1938.
OUDIN (A.). — Variation, en fonction de la densité des peuplements, de l'intensité des radiations solaires. *Rev. Eaux et Forêts,* 1931, p. 393.
OUDIN (A.). — Organisation des observations actinométriques. *Rev. Eaux et Forêts,* 1932, p. 845.
PAETZ (K.-W.). — Untersuchungen über die Zusammenhänge zwischen stomatärer Offnungsweite und bekannten Intensitäten bestimmter Spektralbezirke. *Planta,* 1930.
PARKER (M.-W.) et BORTHWICK (H.-A.). — Annual review of plant physiology. Influence of light on plant growth. Stanford. Californie, 1950.
PAVILLARD (J.). — Eléments de sociologie végétale. Paris, 1935.
PEARSON (G.-A.). — The other side of the light question. *Jour. For.,* 1929.
PEARSON (G.-A.). — Light and moisture in forestry. *Ecology,* 1930.
PENFOUND (W.-T.). — Plant anatomy as conditioned by light intensity and soil moisture. *Am. Jour. Bot.,* 1931.
PERRIN (H.). — Etudes statistiques sur les taillis-sous-futaie. *Annales de l'Ecole Nationale des Eaux et Forêts,* t. X, fasc. 1, Nancy, 1946.
PERS (R.). — Recherche sur les durées d'insolation. Paris, 1937.
PFEIFFER (N.-E.). — Anatomical study of plants grown under glasses transmitting light of various range and wave lenghts. *Bot. Gaz.,* 1928.
POKROWSKI (G.-I.). — Ueber die Lichtabsorption von Blättern einigen Bäume *Biochem. Zeits.,* 1925.
POPP (H.-W.). — A physiological study of the effect of light of various range of wave lenght on the growth of plants. *Amer. Jour. Bot.,* 1926.
POPP (H.-W.) et BROWN (F.). — A review of recent work on the effect of ultraviolet upon seld plants. *Bull. Tongclub,* 1933.
QUANTIN (A.). — L'évolution de la végétation à l'étage de la chênaie dans le Jura méridional. Paris, 1935.
RAISANZEV (A.-W.). — Zur Frage über die Saisonveränderungen des Assimilationapparates bei einigen von unseren Wintergrünen Pflanzen. *Bull. Inst. Rech. Biol. Stat. Perm.,* 1930.

RAMALEY (F.). — Growth of plants under continuous light. *Science,* 1931.
RAYNAUD-BEAUVERIE (Mme). — La vie en commun des Plantes. Paris, 1936.
REUD. MARY (E.). — Nombreuses études. *Am. Jour. B. r.,* 1926-1933.
RIBLET (J.). — Problèmes d'insolation. Lyon, 1952.
RICHTER (A.-A.) et VASSILIEVA (N.-G.). — Pulvérisation d'oligoéléments pour favoriser la photosynthèse. *C. R. Acad. Sci. U.R.S.S.,* 1941.
ROL (R.). — Les Hormones végétales. Leurs applications en matière forestière. *Revue des Eaux et Forêts,* mars 1947.
ROUSSEL (L.). — La régénération de l'épicéa dans le Haut-Doubs. *Bulletin Société Forestière de Franche-Comté,* décembre 1946.
ROUSSEL (L.). — Couvert et photométrie. *Bulletin Société Forestière de France-Comté,* décembre 1948 et juin 1949.
ROUSSEL (L.). — L'épicéa du Haut-Doubs et l'été de 1949. *Bulletin Société Forestière de Franche-Comté,* juin 1950.
ROUSSEL (L.). — Petite Histoire de la Photologie forestière. *Bulletin Société Forestière de Franche-Comté,* mars 1951.
RÜBEL (E.). — Lichtklima und Lichtgenuss. Abderhalden, 1928.
SAKHAROV (M.-I.). — Influence des différents étages des coenoses forestières sur la radiation et sur l'éclairement. *Dokl. Akad. Nauk. U.R.S.S.,* 1948.
SARVAS (R.). — Effect of light on the germination of forest tree seeds. *Acta ecolog. Scand.,* 1950.
SCHANDERL (H.) et KAEMPFERT (W.). — Ueber die Strahlungsdurchlässigkeit von Blättern und Blattgeweben. *Planta,* 1933.
SCHNELL (R.). — Structures d'ombre et de soleil chez l'épicéa. Lyon, 1942.
SEMMENS (E.). — Chemical effects of moonlight. *Nature,* London, 1947.
SEYBOLD (A.). — Ueber die optischen Eigenschaften der Laub-blätter. *Planta:* I, 1932; II, 1932; III, 1933; IV, 1933.
SEYBOLD (A.). — Ueber den Lichtgenuss der Sonnen- und Schattenpflanzen. *Ber. Deut. Bot. Ges.,* 1934.
SEYBOLD (A.) et WEISSWEILLER (A.). — Zur Klärung einiger elementarer optischer Fragen der Photophysiologie. *Bot. Ar.,* 1943.
SHIRLEY (H.-L.). — The influence of light intensity and light quality upon the growth of plants. *Amer. Jour. Bot.,* 1929.
SHIRLEY (H.-L.). — Light sources and light measurements. *Plant. Phys.,* 1931.
SHIRLEY (H.-L.). — Light and moisture as factors in forest succession. *Bull. Ecol. Soc. Amer.* 1932.
SHIRLEY (H.-L.). — Light intensity in relation to plant growth in a virgin Norway pine forest. *Jour. Agri. Resear.,* 1932.
SHIRLEY (H.-L.). — Influence of light intensity on higher plants, submitted for publication in Surwey of effects of radiation on Organism by National Research Council.
SHIRLEY (H.-L.). — Some factors influencing drought resistance in conifers. *Jour. Agri. Resear.,* 1935.
SHIRLEY (H.-L.). — Light as an ecological factor and its measurement. *Ecology,* 1945.
SHREVE (F.). — Physical conditions in sun and shade. *Ecology,* 1928.
SHULL (C.-A.). — A spectophotometric study of reflection of light from leaves surfaces. *Bot. Gaz.,* 1929.
SIDORIN (M.-I.). — Activité photochimique des rayons solaires ayant traversé des feuilles vertes des plantes ou réfléchies par elles. *Bot. Zh. U.R.S.S.,* 1948.
SIERP (H.). — Untersuchungen über die Offnungsbewegung der Stomata in verschiedenen Spektralbezirken. Flora, 1933.
SILVY-LELIGOIS (P.). — Le forestier entre l'ombre et la lumière. *Journal Forestier Suisse.* Zurich, 1950.
SIMPSON (G.-C.). — Analysé par GIRAUD. L'électricité des nuages et la pluie. *La météorologie.* Paris, 1945.

SINGH (B.-N.) et LAL (K.-N.). — Limitations of Blakman's law of limiting factors and Harder's concept of relative minimum as applied to photo synthesis. *Plant. Phys.*, 1935.
SPOHN (H.). — Ueber die optischen Eigenschaften herbstlich gefärbter Laubblätter. *Planta*, 1934.
STAFELT (M.-G.). — Untersuchungen sur Okologie der Köhlensaüre assimilation der Nadelbäume. Medd. Stutens. *Skgsförsokanstalt*, 1925.
STAFELT (M.-G.). — Die physiologish - ökologischen Bedingungen der Kronenreinigung, Schaftreiningung, und der Natürlichen Bestandesreinigung der Fichte. *Skogsva. Tidsckr.*, 1932.
STABELT (M.-G.) et STEINBAUER (G.-P.). — Light as a factor in the growth and metabolism of coniferous seedlings. Diss. Uni. of Minnesota, 1929.
STAFELT (M.-G.) et STEINBAUER (G.-P.). — Growth of tree seedlings in relation to light intensity and concentration of nutrient solution. *Plant. Phys.*, 1932.
STAHL. — *Bot. Zeit.*, 1880.
STAHL. — *Jenaisch. Zeitschr. f. Natuwiss*, 1883.
STOUTMYER (V.-T.) et CLOSE (A.-V.). — Rooting cuttings and germinating seeds under fluorescent and cold cathode lighting. *Proc. Amer. Soc. Hortic. Sci.*, 1946.
TAUSON (V.-O.). — Traits fondamentaux de l'évolution de la bioénergétique végétale. *Sovetsk. Biol.*, 1947.
TERRIEN (J.). — La cellule photoélectrique. Paris, 1947.
TERRIEN (J.). — Lumière et végétation. Paris, 1951.
THEODORESCO (E.-C.). — Observations sur la croissance des plantes aux lumières de diverses longueurs d'ondes. *Annales Soc. Bot.*, 1929.
TOUMEY (J.-W.). — The vegetation of the forest floor - light versus soil moisture. *Proc. Int. Cong. Plant. Sci. Ithaca*, 1929.
TOUMEY (J.-W.) et KIENHOLZ (R.). — Trenched plots under forest canopies. *Yale Forest School Bull.*, 1931.
TOUMEY (J.-W.) et NEETHLING (E.-J.). — Insolation. A factor in the natural regeneration of certains conifers. *Yale Forest School Bull.*, 1924.
TRAPP (E.). — Untersuchungen über die Verteilung der Helligkeit in einem Buchenbestand. *Bioklima. Beibl. der Meteor Zeits.*, 1938.
TROCHAIN (J.). — Mesures actinométriques au Sénéral. *La Météorologie*, 1937.
TRONCHET (M.-A.). — Aperçu historique et bibliographique sur la floristique et la phytosociologie en Franche-Comté et régions limitrophes. *Ann. Sci. Franche-Comté. Bot.*, 1951.
VERCELLI (M.). — Periodicita dendrologische et cicli solari. *Ann. Géofis. Ital.*, 1949.
VLES (F.). — Les conditions biologiques créées par les propriétés électriques de l'atmosphère, 1940.
WAGNER. — Influence de la lumière sur la répartition locale des espèces de quelques associations méditerranéennes. Montpellier, 1938.
WARBURG (O.) et NEGELEIN (E.). — Ueber die Einfluss der Wellenlänge auf dem Energieumsatz bei der Kohlensäureassimilation. *Zeits Phys. Cemic*, 1923.
WARBURG (O.). — Ueber den Quantenbedarf der Kohlensäureassimilation. *Natürwissenschaften Dtsch.*, 1946.
WEAVER (J.) et CLEMENTS (F.-E.). — Plant ecology. New York, Londres, 1929.
WELLNER (C.-A.). — Light intensity related to stand density in mature stands of the western white pine type. *Jour. Fores.*, 1948.
WIESNER (J.). — Der Lichtgenuss der Pflanzen. Leipzig, 1907.
WIESNER (J.). — Lichtmessung und Lichtverhältnisse im Walde. Vienne, 1909.
WILLSTATTER (R.) et STOLL (A.). — Untersuchungen uber der Assimilation der Köhlensäure. Berlin, 1918.

WITHROWW (R.-B.) et BENEDICT (H.-M.). — A preliminary investigation of the growth promoting effect of selected ultraviolet radiations on plants. *Bull. Bas. Sci. Res. Univ. Cincinnati,* 1931.

WURMSER (R.). — Recherches sur l'assimilation chlorophyllienne. Strasbourg, 1921.

ZELLER (A.). — Ueber Licht - und Strahlungsmessungen. *Ber. der deutsbotanis. Gesel.,* 1934.

ZACHAROWA (T.-M.). — Ueber den Gasstoffwechsel der Nadelholzpflanzen im Winter. *Planta,* 1929.

2° **THÈSE**

Propositions données par la Faculté

Les tourbières de Frasne (Doubs) ;
leur évolution sous l'action de l'homme.

Transmis à M. le Recteur pour permis d'imprimer :

Pour le Doyen de la Faculté des Sciences,
Le Professeur Délégué :
Dr Jullien.

Vu et permis d'imprimer :
Le Recteur,
Président du Conseil de l'Université :
R. Doucet.
Besançon, le 24 septembre 1952.

Imprimerie Georges Thomas-Nancy
Dépôt légal 3/1953 - N° 286